



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E AMBIENTE

César Macke Oliveira

**VALIDAÇÃO DO MODELO R.SUN PARA A ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO
SOLAR NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NEGRO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Bagé

2016

CÉSAR MACKE OLIVEIRA

**VALIDAÇÃO DO MODELO R.SUN PARA A ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO
SOLAR NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NEGRO**

Trabalho de conclusão de curso II, apresentado para o Curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Alexandro Gularte Schäffer

Bagé

2016

CESAR MACKE OLIVEIRA

ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NEGRO UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO E MODELOS DE SIMULAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso II, apresentado para o Curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente.

Prof. Dr. Alexandro Gularte Schäfer.

Trabalho de conclusão de curso apresentado em 14 de dezembro de 2016.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Allan Seeber

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes

Prof. Dr. Alexandro Gularte Schäffer

RESUMO

O objetivo do presente estudo é realizar a validação do modelo r.sun que realiza simulações de insolação e radiação global na plataforma GRASS GIS para estimar o potencial solar na bacia hidrográfica do Rio Negro, Rio Grande do Sul. As simulações de radiação global diária foram realizadas para dezesseis dias, extraídos ao longo de um período de um ano. Para a validação do modelo comparou-se os valores de radiação global diária simulados com os valores registrados na estação meteorológica automática Bagé-A827 do INMET. Como resultado do desenvolvimento da pesquisa, foram gerados os mapas de elevação, de declividade, de aspecto, de distribuição espacial da radiação global diária e de distribuição espacial da insolação diária, para a área de abrangência da bacia hidrográfica. O valor máximo de irradiação global diária encontrado foi de 9500,00 Wh/m² no solstício de verão, enquanto o valor mínimo foi de 3246,00 Wh/m², no solstício de inverno. A insolação diária apresentou valores mínimos de 9,32 h no inverno e valores máximos de 13,66 h no verão.

Palavras-chave: radiação solar, grass gis, r.sun.

ABSTRACT

The objective of the present study is to estimate the photovoltaic potential in the Rio Negro basin, Rio Grande do Sul, from computational models and geoprocessing techniques. For this, the R.SUN model was used, which performs simulations of solar radiation and global radiation on the GRASS GIS platform. The simulations of daily global radiation and insolation had been performed for sixteen days over a period of one year. The simulated daily global radiation values were compared with the values recorded in the INMET Bagé-A827 automatic climatological station. As a result of the research development, maps of elevation, slope, aspect, spatial distribution of daily global radiation and spatial distribution of daily sunshine were generated for the area covered by the river basin. The maximum value of daily global radiation found was 9500,00Wh / m² in the summer solstice, while the minimum value was 3246,00Wh / m², in the winter solstice. The daily insolation presented minimum values of 9.32h in the winter and maximum values of 13.66h in the summer. The values for the simulated daily global radiation were, in general, higher than the values recorded by the INMET climatological station during the study period.

Keywords: solar radiation, simulation, r.sun.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Arquimedes incendeia a frota romana	19
Figura 2: Primeira aplicação de uma célula de silício.....	21
Figura 3: Trajetória da Terra em relação ao Sol.	25
Figura 4: Órbita da Terra em relação ao Sol.	26
Figura 5: Mudança anual da posição solar para o hemisfério sul	27
Figura 6: Angulos solares; ângulo zenital(θ_z), azimute(ζ) e altura solar(α). ...	28
Figura 7: Interface inicial do Grass GIS.....	32
Figura 8: Representação dos pontos cardeais no GRASS.....	33
Figura 9: Bacia hidrográfica do Rio Negro no Brasil e no Uruguai	37
Figura 10: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Negro-RS nos municípios	38
Figura 11: Recorte da imagem STRM da Bacia Hidrográfica do Rio Negro-RS	39
Figura 12: Localização da estação INMET/Bagé na bacia hidrográfica do Rio Negro.....	41
Figura 13: Fluxograma do trabalho	42
Figura 14: Modelo Digital de Elevação da Bacia do Rio Negro	47
Figura 15: Mapa de declividade da bacia	48
Figura 16: Mapa do aspecto do relevo da bacia	49
Figura 17: Altura do ângulo do horizonte para $\theta=90^\circ$ e 180°	50
Figura 18: Interface do r.sun com os dados de entrada para o cálculo da irradiação global.....	51
Figura 19: Interface do r.sun com os dados de saída para o calculo da radiação global.....	52
Figura 20: Estimativa da irradiação global diária para o verão.....	54

Figura 21: Histograma do mapa de estimativa da irradiação global diária para o verão.	54
Figura 22: Estimativa da irradiação global diária para o inverno.	55
Figura 23: Histograma do mapa de estimativa da irradiação global diária para o inverno.	56
Figura 24: Estimativa da irradiação global diária para o outono.	57
Figura 25: Histograma do mapa de estimativa da irradiação global diária para o outono.	57
Figura 26: Estimativa da irradiação global diária para a primavera.	58
Figura 27: Histograma do mapa de estimativa da irradiação global diária para primavera.	59
Figura 28: Estimativa anual da irradiação global diária.	60
Figura 29: Histograma do mapa de estimativa anual da irradiação global diária.	61
Figura 30: Estimativa da irradiação global diária para o equinocio de outono.	62
Figura 31: Estimativa da irradiação global diária pra o equinocio da primavera.	62
Figura 32: Estimativa da irradiação global diária para o solstício de inverno.	63
Figura 33: Estimativa da irradiação global diária para para o solstício de verão.	64
Figura 34: Tempo de insolação para o outono.	65
Figura 35: Tempo de insolação para o inverno.	66
Figura 36: Tempo de insolação para a primavera.	66
Figura 37: Tempo de insolação para o verão.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais características do Sol.....	22
Tabela 2: Parâmetros de entrada do r.sun.....	43
Tabela 3: Parâmetros de saída do r.sun.....	45
Tabela 4: Formas de relevo e classe de declividade.....	48
Tabela 5: Dias julianos utilizados nas simulações.....	52
Tabela 6: Comparação dos dados de irradiação global diária para os meses do ano	68
Tabela 7: Comparação dos dados de irradiação global diária para equinócios e solstícios.....	69

NOMENCLATURA

Z	Altitude do terreno	L
α	Ângulo altura solar	-
ω	Ângulo horário	-
Θ_z	Ângulo zenital	-
γ	Azimute Solar	-
K_{rs}	Coeficiente de ajuste	-
B_{hc}	Componente difusa da irradiação solar para ceu limpo	$M.t^{-3}$
D_{hc}	Componente difusa da irradiação solar para ceu limpo	$M.t^{-3}$
λ_{max}	Comprimento de onda	L
J_o	Constante solar	$M.t^{-3}$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$M.t^{-3}.T^{-4}$

δ	Declinação solar	-
n_j	Dia juliano	-
E	Energia emitida	M.t ⁻³
dr	Fator de correção da excentricidade da Terra	-
hl	Hora local	-
K_c	Índice de céu claro	-
G_{hc}	Irradiação solar global para céu limpo	M.t ⁻³
G_h	Irradiação solar global em condições de cobertura ou nuvem	M.t ⁻³
ϕ	Latitude	-
ε	Permissividade	-
R_a	Radiação solar extraterrestre	M.t ⁻³
T	Temperatura do corpo negro	T
T_{max}	Temperatura máxima	T

<i>T_{min}</i>	Temperatura mínima	T
<i>T_t</i>	Transmitância atmosférica	-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVO	17
2.2 Objetivo geral	17
2.3 Objetivos específicos.....	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Histórico do uso da energia solar.....	19
3.2 O Sol.....	21
3.3 Energia solar.....	22
3.4 Irradiancia solar direta, difusa e global	23
3.5 Radiação solar	24
3.6 Movimento orbital da Terra	25
3.7 Ângulos solares	28
3.8 Modelos de radiação solar aplicados ao mapeamento do potencial solar ..	30
3.9 Software Grass	31
3.9.1 O modelo r.sun	33
4 METODOLOGIA	37
4.1 Área de estudo	37
4.2 Materiais e equipamentos.....	38
4.3 Método.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
5.1 Geração dos dados de entrada	47
5.2 Geração dos dados de saída.....	51
5.2.1 Geração dos mapas de estimativa da irradiação global diária	53
5.2.2 Geração dos mapas de insolação.....	64
5.3 Comparação com os dados da estação INMET/Bagé	67
6 CONCLUSÃO	70
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
APÊNDICE	75

1. INTRODUÇÃO

Os constantes problemas ambientais causados pela utilização de energias não renováveis, aliados ao esgotamento dessas fontes, têm despertado os interesses pela utilização de fontes alternativas de energia. A energia solar é uma boa opção na busca por alternativas menos agressivas ao meio ambiente, pois consiste numa fonte energética renovável e limpa (LEITE, 2005).

De acordo com Pereira et al. (2006), o aumento da demanda energética em conjunto com a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente estão impulsionando a comunidade científica a pesquisar e desenvolver fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental.

Grande parte do Brasil está localizada em uma região intertropical, possuindo assim um potencial considerável para a utilização da energia solar. Essa se torna uma alternativa interessante em longo prazo, pois pode contribuir para manter a oferta de energia em épocas de estiagem, desenvolver regiões remotas que não são conectadas ao sistema interligado nacional e diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, que além de poluir e causar danos a todo ecossistema que se encontra próximo ao seu perímetro, também são conhecidos por sua variabilidade na balança comercial internacional.

Pereira, Angelotti & Sentelhas, (2000) fala que a incidência de radiação na superfície terrestre é o resultado de complexas interações de energia entre a atmosfera e a superfície. Em escala global, os gradientes de radiação são causados pela geometria da terra e seus movimentos de rotação e translação em torno do Sol. Em escalas regional e local, o terreno (relevo) é o principal fator que altera a distribuição de radiação. A variabilidade na altitude, a inclinação da superfície, a orientação e a sombra são expressas pelas características do terreno e criam fortes gradientes locais. A heterogeneidade espacial e temporal da energia

solar recebida determina a dinâmica de muitos processos como o ar, a temperatura e a umidade do solo, a fotossíntese e a evapotranspiração, com impacto direto para a sociedade humana.

O mapeamento da radiação solar incidente é importante para muitas áreas da atividade humana, como a meteorologia e a climatologia. No setor de agronegócio, é importante para o planejamento e obtenção de maior eficiência energética nas diversas etapas de produção: a seleção das culturas, o plantio, a colheita incluindo o desenvolvimento e operação de sistemas de irrigação de áreas e a secagem de grãos. É importante também na área de ecologia, projeto de construção, sensoriamento remoto, energia fotovoltaica, ordenamento do território, etc. (VERNADAT,1996).

O mapeamento da radiação solar tem um importante papel considerando simultaneamente a influência da atmosfera e da topografia. É utilizada em muitas áreas da atividade humana como a meteorologia e a climatologia. No setor de agronegócio, é importante para o planejamento e obtenção da maior eficiência energética nas diversas etapas de produção: a seleção das culturas, o plantio, a colheita incluindo o desenvolvimento e operação de sistemas de irrigação de áreas e a secagem de grãos. É importante também na área de ecologia, projeto de construção, sensoriamento remoto, energia fotovoltaica, ordenamento do território, etc. (PEREIRA, 2006).

Mapas solares podem ser efetivamente usados na correção radiométrica e topográficas em terrenos montanhosos e acidentados, onde investigações muito precisas devem ser realizadas.

Basicamente, existem dois métodos para o levantamento dos recursos de energia solar em uma região: a) a utilização de uma rede de radiômetros distribuídos pela região em conjunto com técnicas de interpolação dos dados de

radiação coletados; e b) o uso de modelos computacionais para determinação de estimativas da radiação solar incidente por meio de relações empíricas ou da solução da equação de transferência radiativa na atmosfera (PEREIRA, 2006).

Existem diversos modelos computacionais desenvolvidos para realizar a estimativa de radiação solar. Esses modelos podem ser classificados em modelos estatísticos e modelos físicos. Os modelos estatísticos utilizam formulações empíricas entre medidas de radiação incidente e condições locais e, portanto, apresentam validade restrita à região estudada. Já os modelos físicos são válidos para qualquer região do planeta uma vez que determinam a solução numérica da equação de transferência radiativa por meio da modelagem dos processos radiativos que ocorrem na atmosfera. A modelagem das interações entre radiação solar e constituintes atmosféricos depende do conhecimento de parâmetros atmosféricos como a quantidade de nuvens presentes e a concentração dos constituintes atmosféricos como aerossóis, vapor d'água, ozônio e outros gases atmosféricos (MARTINS, PEREIRA & ECHER, 2004).

Exemplos de ferramentas para a estimativa de irradiação são o modelo BRASIL-SR e o SOLARCAD. Alguns modelos computacionais trabalham com base em sistemas de informações geográficas (SIG), como o modelo *Solarflux*, o modelo *Solei* e o modelo *R.SUN*.

Guimarães (2011) fala que os sistemas SIG apresentam não só as capacidades de representação da informação georreferenciada, como também permitem analisar e manipular de forma eficiente os grandes volumes de informação que derivam dos modelos numéricos. A evolução no sentido de resultados mais realistas e maior capacidade de análise podem contribuir para enaltecer publicamente as vantagens da utilização de sistemas solares e também em medidas de planejamento energético.

O R.SUN tem sua geometria solar baseada na obra de Krcho (1990) mais tarde melhorada por Jenco (1992). As equações que descrevem a posição Sol-

Terra e a interação da radiação solar com a atmosfera são baseadas originalmente no trabalho de Kitler e Mikler (1986).

Com base no exposto acima pretende-se elaborar mapas de irradiação solar para a bacia hidrográfica do Rio Negro usando o modelo r.sun oriundo do software livre GRASS GIS.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Realizar a validação do modelo r.sun para estimar a irradiação na bacia hidrográfica do Rio Negro, Rio Grande do Sul.

2.2. Objetivos específicos

O objetivo geral abrange os seguintes objetivos específicos:

Gerar o modelo digital do terreno da bacia hidrográfica do Rio Negro-RS;

Gerar cartas de declividade para a bacia hidrográfica do Rio Negro-RS;

Gerar mapas de aspecto da bacia hidrográfica do Rio Negro-RS;

Verificar se o modelo R.SUN é capaz de estimar valores diários para a radiação global diária condizentes com a realidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Histórico do uso da energia solar

A adoração do uso ao sol pode ser reconhecida nos limites iniciais da história da humanidade. Astecas na América, os aborígenes da Oceania, os celtas da Europa, os povos da China e do antigo Egito – praticamente todos os povos agrários adoravam o sol (DIENSTMANN, 2009).

Acredita-se que Herão, de Alexandria tenha construído um sistema para bombeamento de água usando a fonte de energia térmica do calor proveniente do sol. É atribuído a Arquimedes a confecção dos primeiros coletores que se tem notícia. Segundo a lenda, ele teria incendiado uma frota romana na baía de Syracuse em 212 A.C, com um conjunto de espelhos, direcionando a radiação incidente para as velas inimigas como ilustra a figura 1.

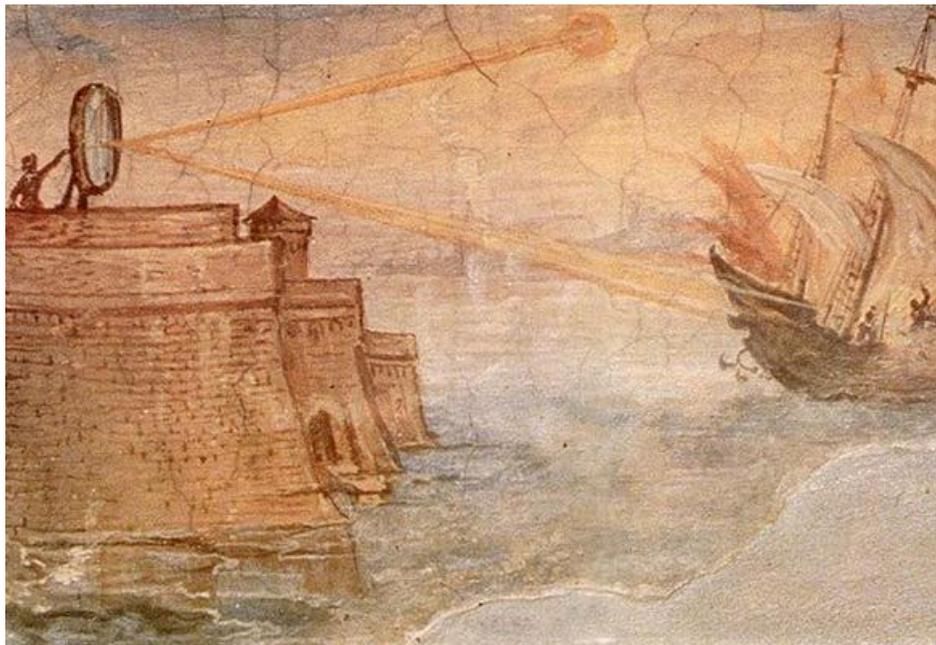


Figura 1 - Arquimedes incendeia a frota romana

Fonte: Energia Solar wordpress (2012)

Durante o século 18 foram desenvolvidas fornalhas solares para derreter ferro, cobre e outros metais. As fornalhas foram usadas na Europa e Oriente Médio. Uma das primeiras aplicações em larga escala foi a fornalha solar construída pelo químico francês Lavoisier, em 1774 (LODI, 2011).

Porém antes de Lavoisier, os também franceses Ambroise Paré e Solomon de Caux já construíam dispositivos para aproveitar a energia solar. O primeiro construiu um alambique solar em 1560 e o segundo em 1615 construiu uma caldeira solar. Soares (2004) diz que de 1860 a 1878 foi a vez de Auguste B. Mouchot, professor no Liceu de Tours, construir diversas caldeiras solares. Ele apresentou em 1866 numa exposição em Paris, a primeira máquina a vapor alimentada por tais caldeiras. Em 1875 realizou as primeiras aplicações da energia solar para o bombeamento de água. Mouchot foi o pioneiro em refrigeração com o emprego da energia solar, utilizando um ciclo de absorção água-amônia.

Apenas em 1901, em Pasadena, EUA que através de sistemas solares para bombeamento de água desenvolvido por Aubrey G. Eneas é que houve um aproveitamento em grande escala da energia solar.

Já a o aproveitamento da energia solar fotovoltaica é bem mais recente, de acordo com Vallera & Brito (2004), o efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz. A figura 2 mostra a primeira aplicação de uma célula solar de silício em 1955 na Geórgia, EUA.



Figura 2 - Primeira aplicação de uma célula solar de silício.

Fonte: Vallera & Brito (2004)

Ainda Vallera & Brito (2004) diz que a primeira célula solar moderna foi apresentada em 1954 e tinha apenas dois centímetros quadrados de área e uma eficiência de 6%, gerando apenas cinco mW de potência elétrica. Cinquenta anos depois, em 2004, foram produzidas cerca de um bilhão de células, com eficiência da ordem dos 16%, ultrapassando pela primeira vez a barreira de um GW de potência elétrica anual instalada.

Segundo ABINEE (2012), no Brasil, as estimativas mais aceitas davam conta de uma capacidade instalada acumulada de sistemas fotovoltaicos, até o final de 2011, de aproximadamente 31,5 MW instalados no país, sendo 30 MWp em sistemas não conectados à rede, e 1,5 MW conectados.

3.2. O Sol

De acordo com Tiradentes (2007), O Sol é, sob todos os aspectos, responsável direto pela manutenção da vida em nosso planeta; e é a origem de todas as formas de energia conhecidas, direta ou indiretamente. É uma imensa bola de gases incandescentes com um volume de cerca de 1,3 milhões de vezes o volume do nosso planeta. Uma gigantesca usina de força que consome 4 milhões de toneladas de matéria por segundo, mas ainda continuará a aquecer e iluminar a Terra por alguns bilhões de anos.

A fonte de energia básica do Sol é a fusão nuclear. Devido às altas temperaturas e densidades do seu interior, ocorre a fusão do hidrogênio, criando energia e produzindo o hélio como um subproduto. Se o Sol parasse hoje de produzir energia seriam necessários 50 milhões de anos para que os efeitos fossem sentidos na Terra (TAVARES, 1999).

É composto quimicamente por hidrogênio, hélio, oxigênio e carbono e suas principais características estão na tabela 1.

Tabela1 – Principais características do sol

Massa (kg)	$1,989 \times 10^{30}$
Raio (km)	695500
Temperatura efetiva(K)	5785
Densidade média (kg/m ³)	1409

Fonte: Astro UFRGS(2016)

3.3. Energia Solar

Praticamente todas as fontes de energia (hidráulica, eólica, combustíveis fósseis, energia dos oceanos e biomassa) derivam do sol e o seu aproveitamento é infundável, considerando nossa escala de tempo na Terra. Como energia solar se descreve a energia obtida do sol, chegando à superfície da Terra como ondas eletromagnéticas (fótons), sejam de maneira direta ou difusa. No sol, é a fusão termonuclear que converte cerca de 650 milhões de toneladas de hidrogênio em hélio cada segundo. Na terra, a energia solar é a origem do ciclo d'água, do vento e da fotossíntese do reino vegetal, do qual depende o reino animal através das cadeias alimentares (DIENSTMANN, 2009).

Como nosso planeta está relativamente distante do sol, apenas parte da irradiação emitida por ele chega até nossa superfície. A intensidade da energia irradiada no nível da atmosfera depende desta distância que varia de acordo com

a órbita da Terra, assim ela é diferente para cada dia do ano, com a finalidade de simplificar os cálculos é considerado um valor médio conhecido como *constante solar* com valor médio igual indicado pela expressão (1):

$$J_0 = 1367 \quad \text{W/m}^2 \quad (1)$$

Pereira, Angelotti & Sentelhas, (2000) define Constante Solar como a densidade de fluxo de radiação solar incidente numa superfície perpendicular aos raios solares, sem os efeitos atenuantes da atmosfera, e a uma distância equivalente a uma unidade astronômica (1 UA). Sem os efeitos da atmosfera significa que esse valor deve ser medido numa altitude onde os fenômenos atmosféricos sejam ausentes (topo da atmosfera). Atualmente, tais medições são feitas por satélites artificiais

3.4. Irradiância solar direta, difusa e global

Freire (2013) diz que a irradiância solar é uma unidade de densidade de potência, usualmente expressa em W/m^2 ou kW/m^2 e Irradiação solar é uma unidade de densidade de energia, usualmente expressa em $\text{kWh/m}^2.\text{dia}$ ou $\text{kWh/m}^2.\text{ano}$. Trata-se da quantidade de energia solar ao longo de certo período, em base diária, mensal, anual etc..

Ainda em Freire (2013) vemos que de toda a radiação solar emitida pelo Sol apenas uma pequena parte é interceptada pela Terra. A radiação direta é essa parcela de radiação solar que atravessa a atmosfera sem encontrar nenhuma obstrução até chegar à superfície da Terra. A outra parcela de energia radiante é proveniente da parte da radiação que ao interagir com a atmosfera terrestre sofre o processo de difusão, atingindo indistintamente, a superfície da Terra por diferentes direções, sendo assim denominada irradiância solar difusa. Já a irradiância solar global é o total de energia proveniente do Sol, sendo a somatória das irradiações direta e difusa, que atingindo a superfície. A irradiação inclinada global nada mais é que o fluxo de radiação em uma superfície com determinada

inclinação. Se fizermos o ângulo de inclinação da superfície igual à angulação da radiação direta então teremos a irradiância direta máxima (FREIRE, 2013).

Freire (2011) fala ainda que para cada ângulo da superfície temos um nível de irradiância diferente e para obter dados precisos para obter o potencial de um local durante o ano seriam medições de longo prazo e no determinado ângulo. Não sendo isso possível, foram desenvolvidos vários modelos para a estimativa da radiação em superfícies inclinadas a partir de medidas de superfícies horizontais. Muitos desses modelos utilizam medidas das radiações global, difusa e direta em superfícies horizontais.

3.5. Radiação Solar

Radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética. Cerca de metade desta energia é emitida como luz visível na parte de frequência mais alta do aspecto eletromagnético e o restante na do infravermelho próximo e como radiação ultravioleta, é a maior fonte de energia para a Terra, além disso, afeta diversos processos: físicos (aquecimento/evaporação), biofísicos (transpiração) e biológicos (fotossíntese) (SCHOFFEL, 2009).

Além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar, turbidez, etc.), a disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação ou revolução). (ANEEL, 2009) conforme ilustra a figura 3.



Figura 3: Trajetória da Terra em relação ao Sol

Fonte: Aneel, 2009

A radiação solar é um importante parâmetro de entrada em modelos diferentes a respeito da indústria de energia, paisagem, vegetação, evapotranspiração, ou sensoriamento remoto.

3.6. Movimento orbital da Terra

O nosso planeta, em seu movimento anual em torno do Sol, descreve em trajetória elíptica um plano que é inclinado de aproximadamente $23,5^\circ$ com relação ao plano equatorial. Esta inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias, dando origem às estações do ano e dificultando os cálculos da posição do Sol para uma determinada data (CRESESB, 2010). A figura 4 mostra o movimento da terra em relação ao sol e a declinação anual do planeta.

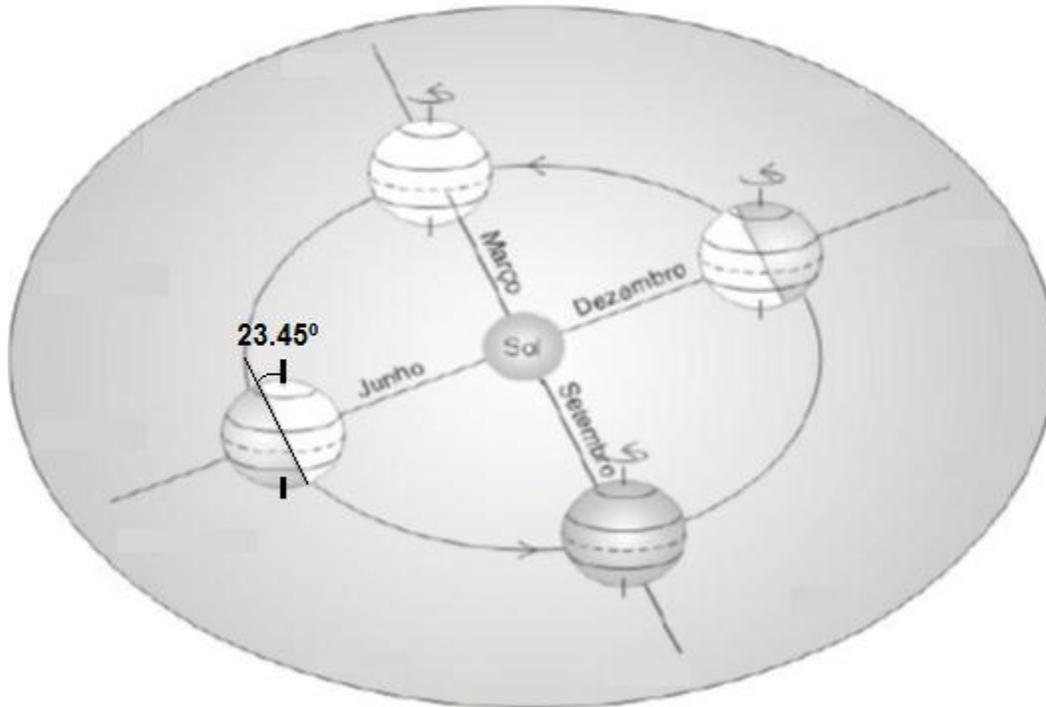


Figura 4 - Órbita da Terra ao redor do Sol.

Fonte: Santiago&Salviano (2000) adaptado pelo autor.

CRESESB (2010) cita ainda que a posição angular do Sol, ao meio dia solar, em relação ao plano do Equador (Norte positivo) é chamada de Declinação Solar (δ). Este ângulo, que pode ser visto na figura 1, varia, de acordo com o dia do ano, dentro dos limites expressos pela equação (4):

$$-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ \quad (2)$$

Ainda em CRESESB (2010) vemos que a soma da declinação com a latitude local determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade na Terra.

O ângulo de declinação é dado pela equação (5):

$$\delta = 23.45 \text{sen}\left(\frac{360(284 + nj)}{365}\right) \quad (3)$$

De acordo com Lodi (2011) esta variação angular aparente é o que causa as estações do ano. O movimento do Sol mais conhecido é o movimento que acontece ao longo de um dia, formando um arco que alcança seu ponto mais alto ao meio-dia. De acordo com as estações do ano, o ponto nascente e ponto poente do Sol mudam, movendo-se gradualmente no sentido setentrional (ao norte), ao longo do horizonte, como mostra a figura 5.

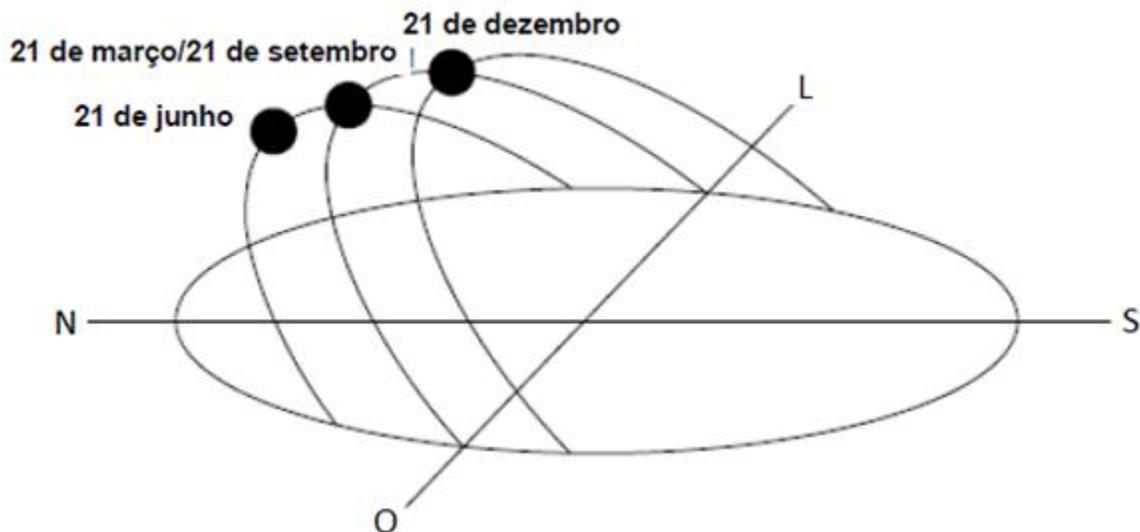


Figura 5 - Mudança anual na posição solar no céu para o hemisfério sul.

Fonte: Lodi (2011) adaptado pelo autor.

Este ângulo tem uma enorme importância no mapeamento solar, pois com a variação da posição do sol no céu, também varia a incidência solar na superfície, aumentando ou diminuindo o potencial solar disponível. Em terrenos acidentados fica mais visível essa diferença, pois potencializa o efeito de sombreamento da superfície em alguns dias do ano, principalmente no inverno onde o sol está mais declinado no horizonte, ocasionando um sombreamento maior de vales e encostas de montanhas.

3.7. Ângulos solares

Ainda para estimar a potencia solar incidente em um ponto do globo é preciso saber exatamente a posição do sol no céu. E essa localização é obtida através de dos ângulos: azimute solar (γ), altura solar (α) e o ângulo zenital (θ_z). A figura 6 ilustra os ângulos solares.

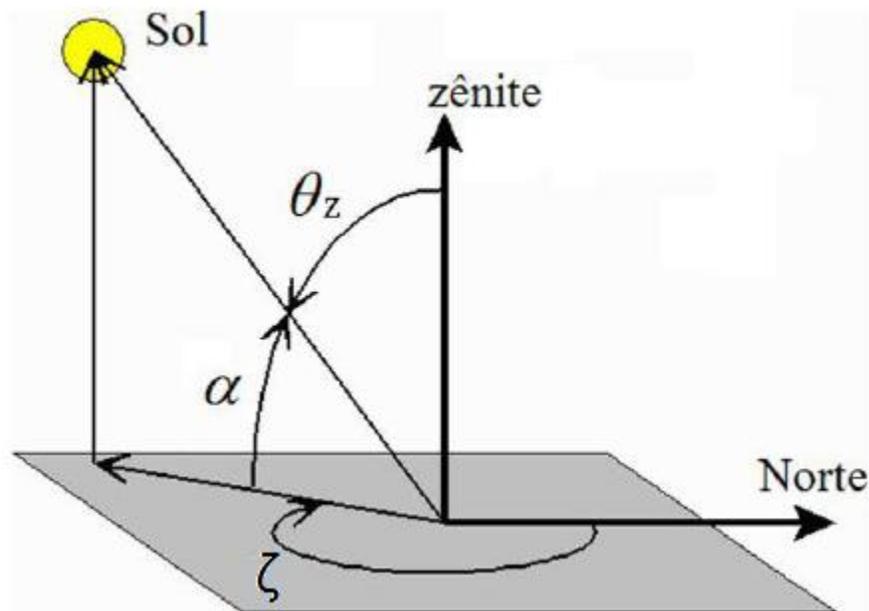


Figura 6 – Ângulos solares; ângulo zenital (θ_z), azimute solar (γ) e ângulo altura solar (α).

Fonte: Campos & de Alcantara (2013) adaptado pelo autor

Porém antes devemos obter o ângulo horário necessário para o cálculo dos demais.

Pereira, Angelocci & Sentelhas(2000) define o ângulo horário como sendo formado pela posição do Sol e o *meridiano* local. A passagem do Sol pelo meridiano local divide o dia em duas partes simétricas. O período de rotação da Terra é de 24 horas, ou seja, este é o tempo entre duas passagens consecutivas do Sol pelo meridiano local. Isso significa que são percorridos 360° em 24h,

correspondendo a 15 por hora. Como a passagem meridiana do Sol é o referencial, a hora local verdadeira (hl) que é expressa em hora e décimos, pode ser convertida em ângulo pela equação (4):

$$\omega = (hl - 12) \cdot 15 \quad (4)$$

O azimute solar é o ângulo formado entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e o eixo norte-sul, a partir do sul. Este ângulo pode variar entre $+180^\circ$ e -180° , sendo positivo a leste do sul. Sua unidade é graus decimais ($^\circ$) e é obtido por meio da equação (5):

$$\zeta = \arccos \left[\frac{(\text{sen}\phi)(\text{cos}\theta_z) - (\text{sen}\delta)}{(\text{cos}\phi)(\text{sen}\theta_z)} \right] \quad (5)$$

Onde: ϕ é a latitude local, δ é a declinação solar e θ_z é o ângulo zenital

A altura solar é o ângulo entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre o plano horizontal. (LODI, 2011). De acordo Campos & de Alcantara (2013), a altitude solar influencia o caminho da radiação solar na atmosfera. Se α decresce, o percurso dos raios solares através da atmosfera aumenta e a radiação solar sofre maior absorção, reflexão ou espalhamento, o que reduz sua intensidade na superfície.

A altura solar pode ser encontrada pela equação (6):

$$\text{sen}\alpha = (\text{sen}\delta) \cdot (\text{sen}\phi) + (\text{cos}\delta)(\text{cos}\phi)(\text{cos}\omega) \quad (6)$$

Lodi (2011) descreve o ângulo do zênite solar (θ_z) como aquele que é formado entre os raios do sol e o zênite. Já Pereira & Angelocci & Sentelhas (2000), diz que o ângulo zenital, θ_z , em uma superfície horizontal, varia em função da latitude (Φ); da hora do dia (ω); e da declinação solar (δ). A combinação desses fatores permite calcular θ_z em cada instante pela relação esférica da equação (7) ou através da equação (8):

$$\cos\theta_z = (\sin\phi) \cdot (\sin\delta) + (\cos\delta)(\cos\phi)(\cos\omega) \quad (7)$$

$$\theta_z = 90 - \alpha \quad (8)$$

3.8. Modelos de radiação solar aplicados ao mapeamento do potencial solar

Os equipamentos de conversão de energia solar na forma de energia térmica e fotovoltaica necessária não são baratos e, por isto, é importante ter um dimensionamento adequado para cada instalação. Isto é verdade tanto para sistemas de conversão térmica quanto para sistemas de conversão fotovoltaica, apesar de que o custo dos equipamentos fotovoltaicos faz com que o dimensionamento deva ser mais preciso neste caso. (KREZINGER & BUGS, 2010)

Krezinger & Bugs (2010) ainda nos diz que das técnicas mais precisas de dimensionamento de sistemas de conversão de energia solar é a simulação do equipamento em operação. Se a simulação for fidedigna é possível extrair muitos resultados. Além de déficit e/ou excedente de energia e demais cálculos de falhas e benefícios daquela proposição, uma simulação detalhada é capaz de identificar as origens de defeitos e erros de projeto nas instalações, ou ainda investigar os efeitos de substituir certos componentes determinados para observar as consequências desta substituição ao longo do tempo.

Várias técnicas foram desenvolvidas para obtenção da solução exata da equação de transferência radiativa. Dentre elas podem-se citar os métodos que utilizam harmônicos esféricos, ordenadas discretas, técnica de Monte Carlo e diferenças finitas. Estas técnicas necessitam um tempo computacional elevado, inviabilizando seu uso operacional. Como alternativa, foram desenvolvidos

métodos aproximados que demandam um tempo computacional muito menor e possibilitam a obtenção de estimativas confiáveis de irradiação solar para utilização operacional e rotineira (PEREIRA et al., 2006).

Como exemplos de modelos matemáticos, podemos citar o modelo BRASIL-SR, o modelo SRAD e o software SOLARCAD que utiliza internamente modelos matemáticos disponíveis na literatura. Alguns modelos trabalham com base em sistemas de informações geográficas (SIG), como o modelo *Solarflux*, o modelo *Solei* e o modelo *R.SUN*.

O modelo r.sun aplicado para céu-claro é baseado no trabalho realizado para o desenvolvimento do Atlas de Radiação Solar Europeu (Scharmer e Grief 2000, Page et al. 2001, Rigollier 2001).

3.9. Software Grass

A ferramenta essencial nas simulações e desenvolvimento nesta pesquisa é o *software GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System)*. Este é considerado um dos melhores softwares livres na atualidade para análise digital de terrenos e para o desenvolvimento de trabalhos no meio científico, tanto que outros softwares têm desenvolvido *plug-ins* para sua integração, pois ele roda em diversas plataformas computacionais. Um desses é o *Quantum GIS*, que oferece uma interface gráfica mais simples ao usuário, se tornando uma ótima alternativa, uma vez que a interface do Grass se assemelha a linguagem computacional, o que a torna mais complexa. Na figura 7 apresenta-se a interface inicial do Grass.



Figura 7 - Interface inicial do GRASS GIS

Fonte: O autor

Segundo Medeiros (2016) cada função é conduzida por um módulo próprio, o que faz do GRASS um programa bem estruturado e transparente. Além disso, como apenas os módulos necessários estão em execução, os recursos do computador são preservados, e garantem um melhor desempenho do sistema. O *software* engloba mais de 400 funções para:

- Análise geoespacial;
- Modelagem ambiental;
- Mapas temáticos;
- Integração de banco de dados;
- Processamento de imagens.

O *Grass* tem por padrão considerar o leste como 0° em um giro anti-horário, como mostra a figura 8.

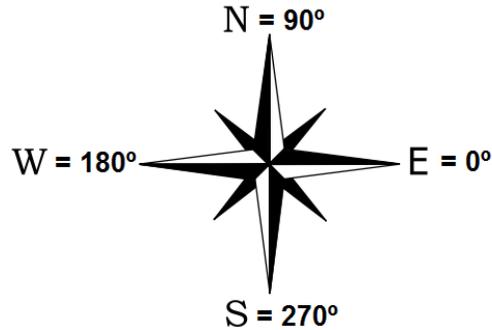


Figura 8 – Representação dos pontos cardeais no GRASS

Fonte: O autor

3.9.1. Modelo R.Sun

O modelo *R.SUN* é um exemplo de modelo que está totalmente integrado ao ambiente de origem do SIG GRASS. Utilizando o *R.SUN*, é possível calcular os componentes da energia solar: a) irradiância; b) irradiação (difusa e refletida) para céu-claro, e céu completamente encoberto, ou seja, não levando em consideração a variação espacial e temporal de nuvens.

O modelo *R.SUN* é especialmente adequado para a modelagem de grandes áreas com terrenos complexos porque todos os parâmetros solares podem ser definidos como mapas matriciais. O mesmo pode ser facilmente utilizado para cálculos de longo prazo em escalas diferentes.

A geometria solar do modelo é baseada na obra de Krcho (1990), mais tarde melhorado por Jenco (1992). As equações que descrevem a posição da Terra, bem como uma interação da radiação solar com a atmosfera tiveram origem a partir das fórmulas sugeridas por Kitler e Mikler (1986). Este componente foi consideravelmente atualizado com os resultados e sugestões do grupo de trabalho coordenado pelo Scharmer e Greif (2000) (este algoritmo pode ser substituído por SOLPOS algoritmo biblioteca incluída no GRASS dentro do *r.sun*)

A extensão e a resolução espacial da área modelada, bem como a integração ao longo do tempo, são limitadas apenas pela memória e recursos de armazenamento de dados. O modelo é construído para atender as necessidades do usuário em vários campos da ciência (hidrografia, climatologia, ecologia e ciências ambientais, a energia fotovoltaica, engenharia, etc) bem como para áreas continentais, regionais até a escala da paisagem. Como opção, o modelo considera um efeito de sombreamento da topografia local.

O R.SUN trabalha em dois modos. No primeiro modo, calcula para um tempo determinado, um ângulo de incidência solar [graus] e os valores de irradiância solar [Wm^{-2}].

No segundo modo as somas diárias de horas de radiação solar [$Wh.m^{-2}.dia^{-1}$] são computadas dentro de um dia definido. Os dois modos podem ser utilizados separadamente ou em combinação para forcener estimativas para qualquer intervalo de tempo desejado.

Vários parâmetros solares são salvos em arquivos dos mapas resultantes, que pode ser visualizado como comando r.info.

Segundo Alvares et al (2011) os parâmetros para calcular os resultados do r.sun são: Constante Solar $1367 W m^{-2}$, irradiância extraterrestre em um plano perpendicular ao feixe solar ($W m^{-2}$), os dias do ano; declinação (radianos), hora decimal (modo 1 apenas), nascer e pôr do sol (min-max) sobre um plano horizontal, comprimento do dia, latitude geográfica (min-max), fator de turbidez Linke (min-max) e albedo do solo (mínimo máximo).

O r.sun estima radiação global (Ghc) para condições de céu claro para uma determinada area integrando as componentes diretas (Bhc) e difusas (Dhc) conforme a equação 11.

$$Ghc = Bhc + Dhc \quad \text{Wh/m}^2 \quad (9)$$

Alvares et. al (2011) fala que o modelo r.sun considera a geometria, revolução e rotação da Terra, fatores que determinam a radiação extraterrestre disponível com base na posição solar acima do horizonte e podem ser calculados com precisão com formulas astronomicas.

O modelo rsun gera estimativas de radiação solar global para condições de céu claro. A radiação solar para dias nublados pode ser calculada a partir dos valores de céu limpo aplicando um fator que parametriza a atenuação causada pela nebulosidade. A equação 10, mostra que o coeficiente índice de céu claro (K_c) representa a razão entre a radiação solar global para céu claro (G_h) e a radiação solar global para períodos nublados (G_{hc}) numa superfície horizontal. Esse coeficiente varia entre 0,25 e 1,00.

$$K_c = \frac{G_h}{G_{hc}} \quad (10)$$

A declinação do sol em radianos acima do equador celestial em radianos em um determinado dia n_j do ano é dada através da equação 11.

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot n_j\right) - 1,39 \quad (11)$$

A latitude dada em graus é convertida para radianos pela equação 12.

$$\phi = \pi \cdot \frac{Lat}{180} \quad (12)$$

Ainda em Alvares et. al (2011) vemos que a radiação extraterrestre pode ser calculada para qualquer dia do ano e latitude de acordo com as equações de Duffie e Beckman (1980) que estão de forma simplificada na equação 13.

$$Ra = \frac{24.60}{\pi} J_0 \cdot dr \cdot [\omega(\text{sen}\delta) \cdot (\text{sen}\phi) + (\text{cos}\delta)(\text{cos}\phi)(\text{cos}\omega)] \quad \text{MJ/m}^2 \quad (13)$$

Onde dr é o fator de correção da excentricidade da Terra e é dado pela equação 14.

$$dr = 1 + 0,333\cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot nj\right) \quad (14)$$

Então através da equação 15, podemos obter a radiação solar incidente no solo (R_s):

$$R_s = R_a \cdot T_t \quad (15)$$

Onde T_t é a transmissividade atmosférica é segundo Alvares (2011) o valor da transmissividade atmosférica (T_t) para um dado dia é proporcional à raiz quadrada da diferença entre temperatura máxima (T_{max}) e temperatura mínima (T_{min}) do terreno. Incluindo uma correção para altitude z do terreno, temos a expressão 16.

$$T_t = K_{rs}(1 + 2.7E - 5z) \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \quad (16)$$

Com o coeficiente de ajuste para regiões interiores ou costeiras K_{rs} , variando de 0,16 no interior do continente onde uma massa terrestre domina e as massas de ar não são fortemente influenciadas por um grande corpo de água até 0,19 em regiões da costa.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a área de estudo, os materiais e o método utilizado para realizar as estimativas do potencial fotovoltaico da bacia hidrográfica do Rio Negro-RS.

4.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Negro (figura 9) abrange o Brasil e Uruguai, totalizando uma área de aproximadamente 69.000km².

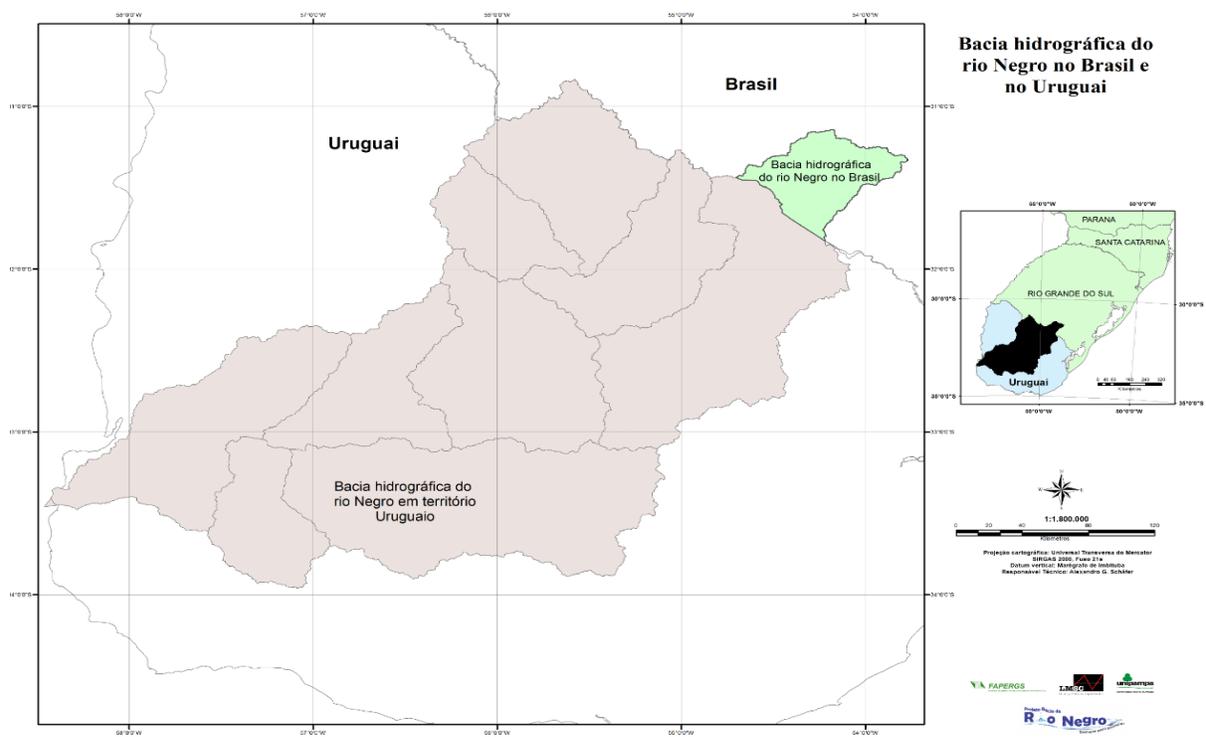


Figura 9 – Bacia hidrográfica do Rio Negro no Brasil e no Uruguai

Fonte: Schäfer (2015)

No Brasil a bacia constitui-se na unidade U-80, conforme a divisão do sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (SERH-RS). Em território brasileiro, possui aproximadamente 3.000km², abrangendo parcialmente os municípios de Aceguá, Bagé, Candiota, Hulha Negra e Dom Pedrito (Figura

10). Está localizada entre as coordenadas 31° 8' 15" e 31° 46' 33" Sul e 54° 41' 59" e 53° 46' 19" Oeste e se desenvolve no sentido nordeste-sudoeste até a fronteira com Uruguai.



Figura 10 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Negro-RS nos municípios

Fonte: Schäfer (2015)

A parte brasileira da bacia abrange as províncias geomorfológicas depressão central e escudo rio-grandense. A irrigação, abastecimento humano e dessedentação animal são as principais formas de uso de suas águas (SEMA, 2016).

4.2. Materiais e equipamentos

- 1) **Imagem SRTM:** Na figura 11 apresenta-se o recorte da imagem SRTM referente a bacia hidrográfica do Rio Negro-RS.

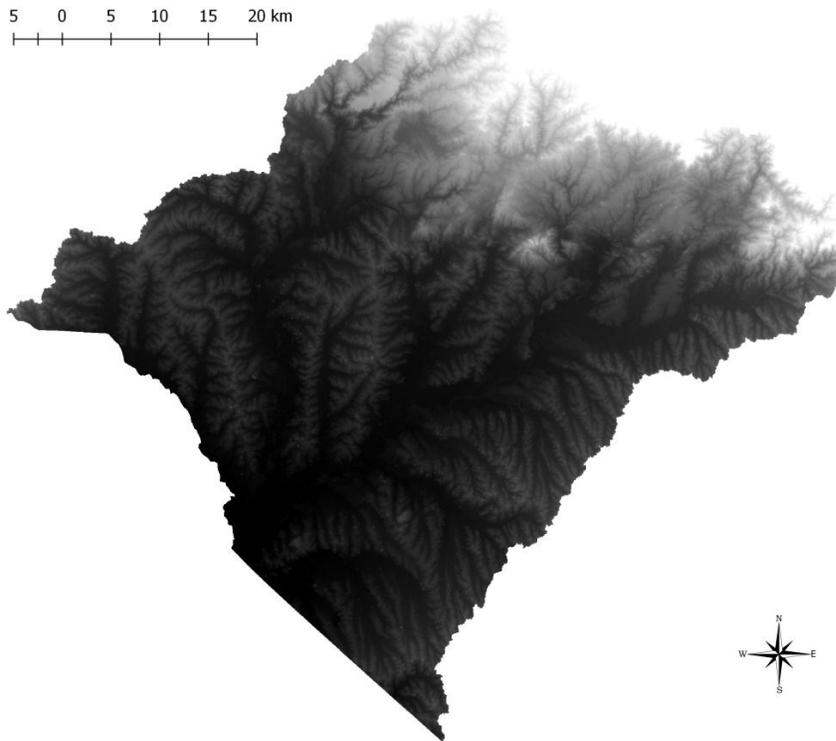


Figura 11: Recorte da imagem STRM da Bacia Hidrográfica do Rio Negro-RS

Fonte: Schäfer (2015) adaptado pelo autor

Os dados SRTM utilizados no estudo possuem as seguintes características:

- Formato: GEOTIFF (16 bits)
- Resolução espacial: 30 metros
- Unidade de altitude: metros
- Sistema de Coordenadas Geográfica UTM: SIRGAS 2000

2) **Software QGIS 2.18.0 Las Palmas:** Assim como o GRASS também é um software livre e por oferecer uma interface mais simples e acessível ao usuário final, optou-se por utilizar o software QGIS para o tratamento e para

a manipulação dos dados do SRTM. Neste trabalho, utilizou-se o QGIS para a manipulação das imagens de base, até obter-se o MDE da Bacia Hidrográfica do Rio Negro. Este arquivo foi a base para todas as simulações realizadas nesta pesquisa. Além disso, foi utilizado para exportar imagens para o formato .PNG, para manipular as imagens e para gerar os mapas (inserção de escalas, legendas e rosa dos ventos), uma vez que suas ferramentas permitem um manuseio mais simples que as do *GRASS GIS*. Foi utilizado, ainda, para realizar conversão de sistemas de projeção (por exemplo, de WGS84 para SIRGAS 2000).

3) **Software GRASS GIS 7.0.5:** O GRASS foi utilizado para gerar todas as simulações de potencial fotovoltaico realizadas nesta pesquisa. Para tanto, foram utilizadas as seguintes extensões:

- a) **Modelo r.slope.aspect:** Ferramenta do *GRASS GIS* responsável por gerar os mapas de aspecto e declividade.
- b) **Modelo r.horizon:** Ferramenta do *GRASS GIS* responsável por calcular a altura ângulo de horizonte.
- c) **Modelo r.sun:** Plataforma do *GRASS*, responsável por gerar todos os mapas de irradiação e parâmetros solares.

4) **Dados da estação meteorológica automática Baçé-A827 do INMET:** Utilizaram-se os dados reais da estação que está localizada dentro do perímetro da bacia hidrográfica para efeitos de comparação e validação dos dados simulados. Na figura 12 apresenta-se a localização da estação climatológica na área de estudo.

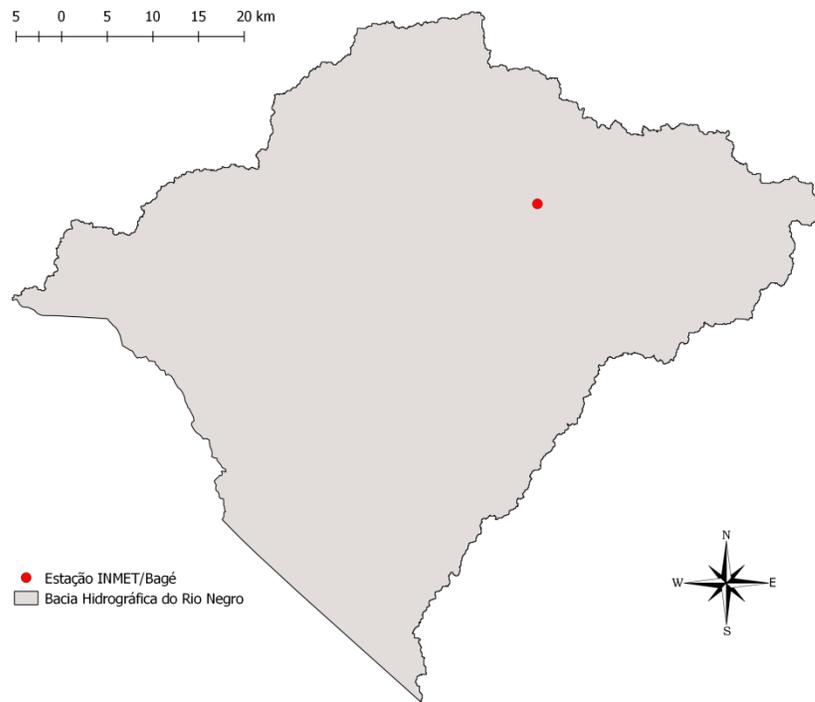


Figura 12 – Localização da estação INMET/Bagé na bacia hidrográfica do Rio Negro

Fonte: Autor (2016)

4.3. Método

A figura 13 mostra as etapas do trabalho.

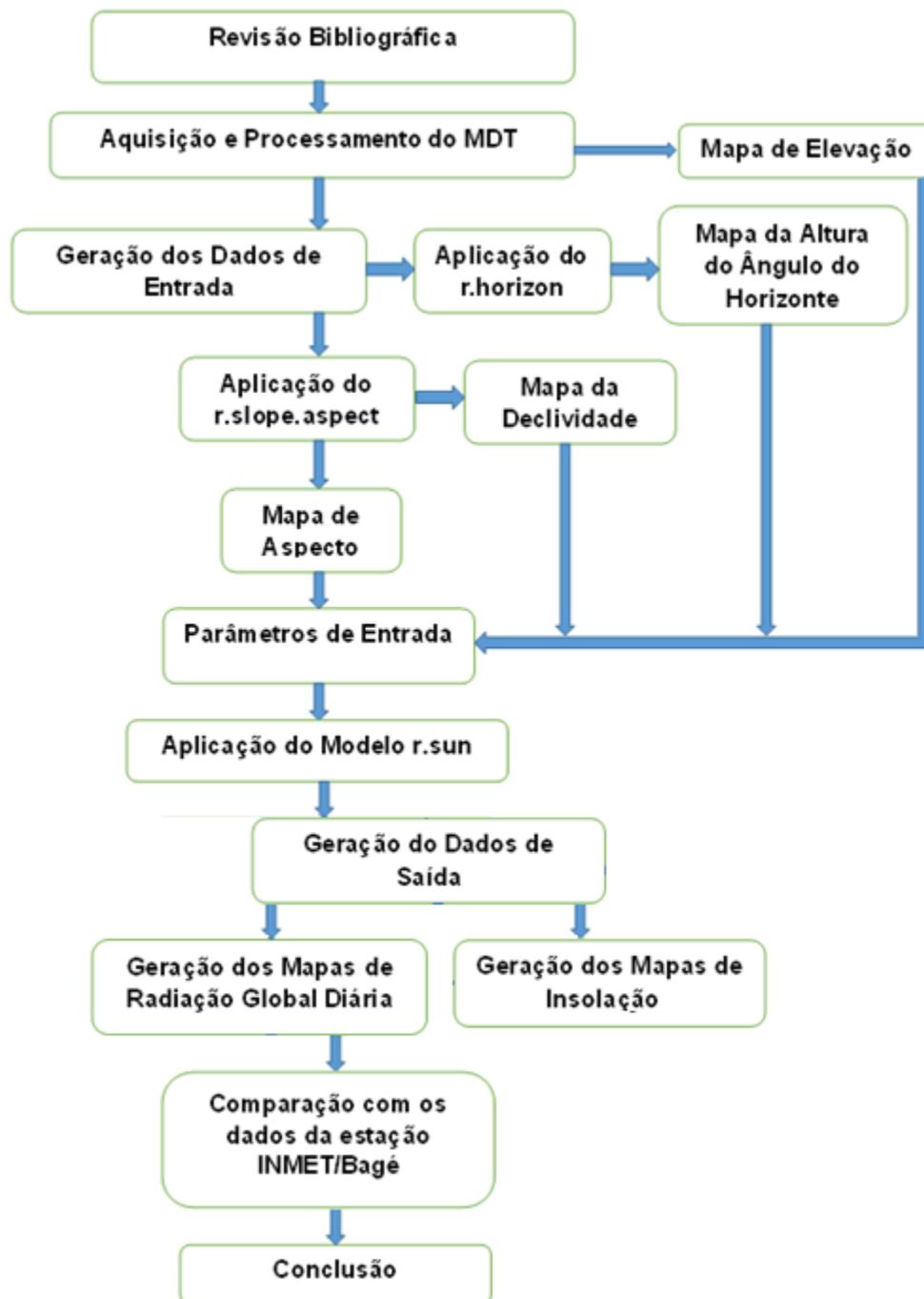


Figura 13 – Fluxograma do trabalho

Fonte: Autor (2016)

Inicialmente foi realizada a revisão bibliográfica, que versou sobre os temas que constituem a base para o desenvolvimento desta pesquisa. Em seguida, procedeu-se a aquisição e o processamento do Modelo Digital do Terreno (MDT), bem como de outros dados necessários para rodar o R.SUN. Conforme apresentado anteriormente, alguns dados foram oriundos de pesquisas em andamento ou já realizadas na Universidade Federal do Pampa (Unipampa). O processamento dos dados consistiu na alteração de formato e na reprojeção de arquivos.

A partir do MDT, foi confeccionado o mapa de elevação da bacia hidrográfica, em ambiente SIG.

A próxima etapa consistiu na geração de dados de entrada necessários para o R.SUN. Na tabela 2 apresentam-se os parâmetros de entrada para o modelo R.SUN.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada do r.sun

Parâmetro	Entrada	Descrição	Modo	Unidade	Intervalo
Elevation	matricial	Elevação	1,2	<i>metros</i>	<i>0- 8900</i>
Aspect	matricial	Aspecto	1,2	<i>Graus</i>	<i>0-360</i>
Aspect_value	valor	Orientação	1,2	<i>Graus</i>	<i>0-360</i>
Slope	matricial	Inclinação	1,2	<i>Graus</i>	<i>0-90</i>
Slope_value	valor	Valor da inclinação	1,2	<i>Graus</i>	<i>0-90</i>
Linke	matricial	Turb.atmosférica	1,2	<i>Adimensional</i>	<i>0->>7</i>
Linke_value	valor	Turb. atmosférica	1,2	<i>Adimensional</i>	<i>0-1</i>
Albedo	matricial	Albedo	1,2	<i>Adimensional</i>	<i>0-1</i>
Albedo_value	valor	Albedo	1,2	<i>Adimensional</i>	<i>0-1</i>

Lat	matricial	Latitude	1,2	<i>Graus</i>	-90-90
Long	Valor	Longitude	1,2	<i>Graus</i>	-90-90
Coef_bh	matricial	Coef. para céu claro	1,2	<i>Adimensional</i>	0-1
Coef_dh	matricial	Ind. de difusão para	1,2	<i>Adimensional</i>	0-1
Horizon_basename	matricial	Altura do ângulo do	1,2	<i>Graus</i>	0-1
Horizon_step	valor	Ângulo de passo	1,2	<i>Graus</i>	0-360
Day	valor	Número do dia	1,2	<i>Adimensional</i>	1-366
time	valor	Hora solar	1	<i>Horas</i>	0-24
step	valor	Intervalo de tempo	2	<i>Horas</i>	0-24
civil_time	valor	Fuso horário civil	1	<i>Horas</i>	-12-12

Segue-se a descrição de cada variável de entrada:

- ❖ Elevation = Nome de entrada do mapa de elevação.
- ❖ Aspect = Nome de entrada do mapa de aspecto (aspecto do terreno ou azimute do painel solar).
- ❖ Aspect_value = Valor de orientação, considera-se leste como zero no sentido anti-horário, assim o sul é igual a 270°.
- ❖ Slope = Nome de entrada do mapa de declividade matricial (declive do terreno ou inclinação do painel solar).
- ❖ Slope_value = Valor de inclinação. Padrão 0,0
- ❖ Linke = Nome do mapa de turbidez atmosférica.
- ❖ Linke_value = Valor do coeficiente de turbidez atmosférica. Padrão: 3,0.
- ❖ Albedo = Nome de entrada do coeficiente de albedo do terreno.
- ❖ Albedo_value = Valor do coeficiente de albedo do solo, Padrão: 0,2.
- ❖ Lat = Nome de entrada do mapa contendo latitudes.
- ❖ Long = Mapa de entrada contendo longitudes.

- ❖ Coef_bh = Nome de entrada do feixe de radiação solar.
- ❖ Coef_dh = Nome de entrada de radiação para céu-claro.
- ❖ Horizont_basename = Mapa de entrada do horizonte.
- ❖ Horizont_step = Tamanho do intervalo de tempo para o ângulo horizonte multidirecional
- ❖ Day = N^o de dias do ano (1-365) Opções: 1-365.
- ❖ Time = Hora local (solar) (utilizado para o modo 1) Opções: 0-24.
- ❖ Step = Intervalo de tempo de computação, quando durante todo o dia somas de radiação. Padrão: 0,5.
- ❖ civiltime = Valor do fuso Civil.

Para gerar esses dados, utilizou-se as extensões r.horizon e r.slope.aspect. O produto da utilização do r.horizon foi o mapa de altura de ângulo no horizonte na área da bacia hidrográfica. Os produtos da utilização do r.slope.aspect foram o mapa de declividade e o mapa de aspecto da bacia. Esses mapas, juntamente com o modelo de elevação, constituíram os mapas básicos para o modelo.

Em seguida, foram informados/configurados os demais parâmetros de entrada para o modelo. Os valores para alguns desses parâmetros (como o Albedo) foram obtidos da literatura, dada a dificuldade de obtê-los a partir de medições em campo.

Com todos os parâmetros e dados de entrada preparados, deu-se início à execução das simulações no R.SUN. Na tabela 3 apresentam-se os parâmetros de saída da modelagem utilizando o R.SUN.

Tabela 3 - Parâmetros de saída do r.sun

Parâmetro	Tipo de dado	Descrição	Modo	Unidade
incid_out	String	Ângulo de incidência solar	1	Graus

beam_rad	String	Feixe de irradiância	1	W.m ²
diff_rad	String	Feixe de difusão	1	W.m ²
refl_rad	String	Irradiância refletida no solo	1	W.m ²
glob_rad	String	Irradiância global	1	W.m ²
insol_time	String	Tempo de insolação	2	Horas
beam_rad	String	Feixe de irradiação	2	W.m ² .dia ⁻¹
diff_rad	String	Difusão da irradiação	2	W.m ² .dia ⁻¹
refl_rad	String	Irradiação refletida no solo	2	W.m ² .dia ⁻¹
glob_rad	String	Irradiação global	2	W.m ² .dia ⁻¹

Utilizou-se apenas o modo dois do modelo de simulação, obtendo-se assim as irradiações diárias pretendidas. Segue-se a descrição dos parâmetros de saída do modelo:

- ❖ incidout = Mapa de saída do angulo de incidência (modo 1 somente)
- ❖ beam_rad = Mapa de saída do feixe de Irradiância ou mapa de irradiação.
- ❖ diff_rad = Mapa de saída de Irradiância difusa ou mapa matricial.
- ❖ refl_rad = Mapa de saída de irradiância refletida ou mapa de irradiação.
- ❖ glob_rad = Produção global (total) irradiância / irradiação ou mapa de irradiância / irradiação.
- ❖ insol_time = Mapa de saída do tempo de insolação.

Devido a utilização de um notebook (que não possui poder computacional elevado), foram escolhidos apenas alguns dias durante o período de um ano para realizar as simulações. As simulações resultaram em mapas de radiação global diária e em mapas de insolação, que são apresentados ao longo do capítulo cinco.

A última etapa da pesquisa consistiu em comparar os dados simulados pelo modelo R.SUN com os dados registrados na estação climatológica do INMET.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Geração dos dados de entrada

Na figura 14 apresenta-se o mapa de elevação da bacia hidrográfica do Rio Negro-RS gerado no GRASS.

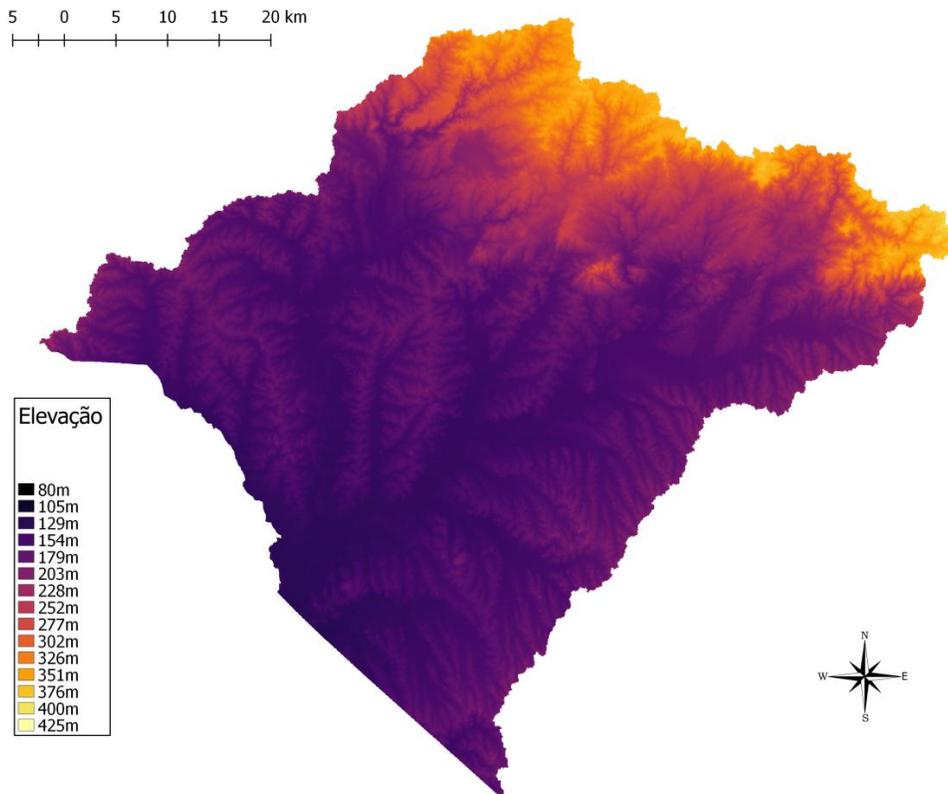


Figura 14 – Modelo Digital de Elevação da Bacia do Rio Negro

Fonte: O Autor

Este arquivo que está na forma *raster (matricial)* foi utilizado como base de todas as simulações deste trabalho, tanto os parâmetros de entrada como os de saída, derivam-se dele.

Primeiro utilizou-se a ferramenta *r.slope.aspect* para obtermos os mapas de declividade e aspecto do terreno. Na figura 15 apresenta-se o mapa de declividade da bacia hidrográfica do Rio Negro-RS.

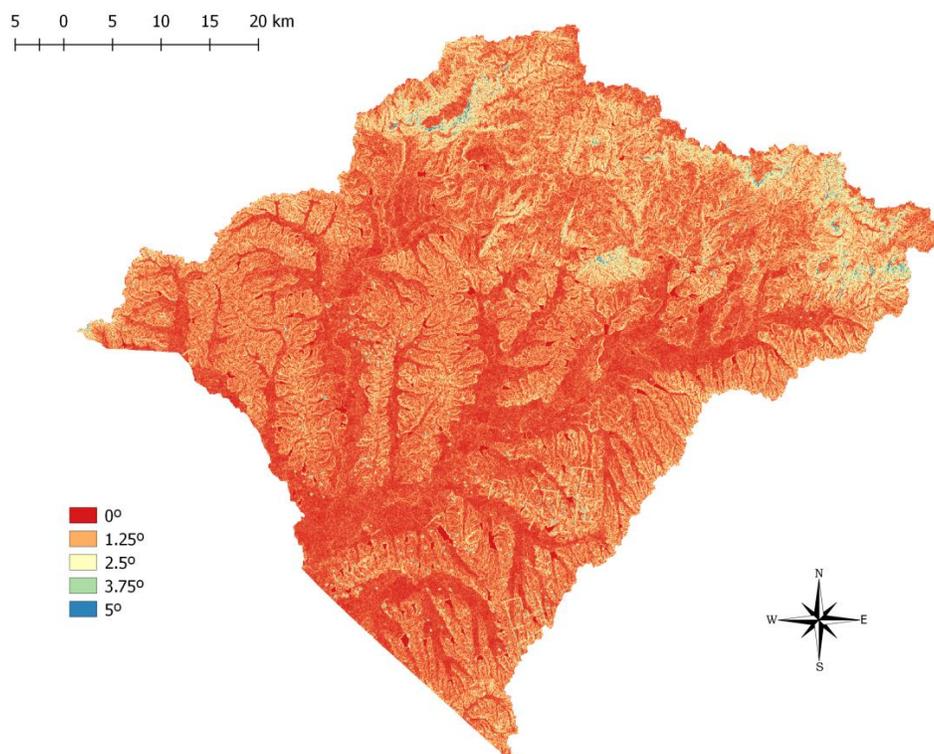


Figura 15 – Mapa de declividade da bacia

Fonte: O autor

O mapa de declividade representa a taxa de inclinação que uma vertente apresenta em relação ao eixo horizontal da projeção, ou seja, quanto maior a declividade maior a inclinação. A tabela 4 mostra as classes de declividade.

Tabela 4 – Formas de relevo e classes de declividade

Relevo	Intervalo de declividade
Plano/Praticamente Plano	0 a 3
Suave ondulado	3 a 8
Moderadamente ondulado	8 a 13
Ondulado	13 a 20
Fortemente Ondulado	20 a 45
Montanhoso	<45

Fonte: Ramalho Filho e Beck (1995)

Analisando a figura 15 de acordo com a tabela 4 é possível verificar que a bacia hidrográfica apresenta um relevo plano a suave ondulado.

Na figura 16 apresenta-se o mapa de aspecto da bacia hidrográfica do Rio Negro-RS.

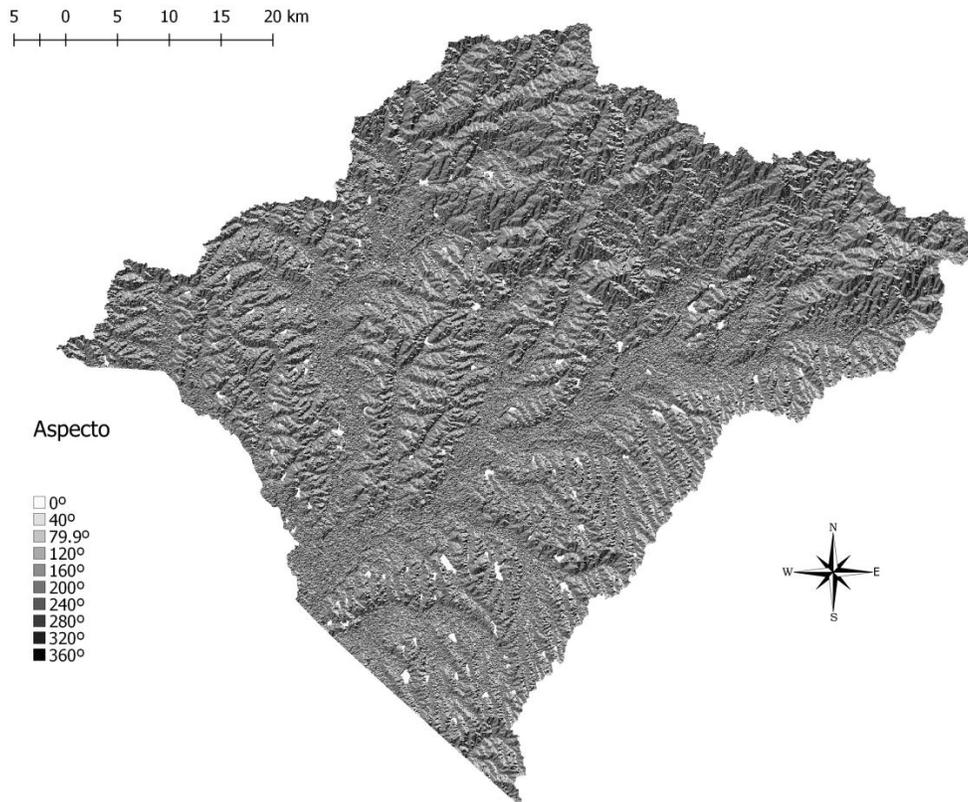


Figura 16 – Mapa do aspecto do relevo da bacia

Fonte: O autor

O mapa de aspecto identifica a direção da curva descendente da taxa máxima de mudança de valor de cada célula para a vizinhança. Ele representa a direção de inclinação, variando de 0 a 360° seguindo o padrão do GRASS, que adota o sentido anti-horário com o leste como zero.

Em seguida, aplicou-se a ferramenta r.horizon, onde se obteve os mapas que definem a altura do ângulo do horizonte. Foi utilizado um passo de 5°, o que resultou em 72 mapas conforme mostra a equação 11:

$$n = \left(\frac{360}{5}\right) = 72 \quad (11)$$

Esse passo implica que a cada 5° o modelo executará uma simulação, até completar a varredura de 360° no mapa de elevação. A figura 17 apresenta dois desses mapas com a altura do ângulo do horizonte para teta 90°(direção norte) e teta 180°(direção oeste).

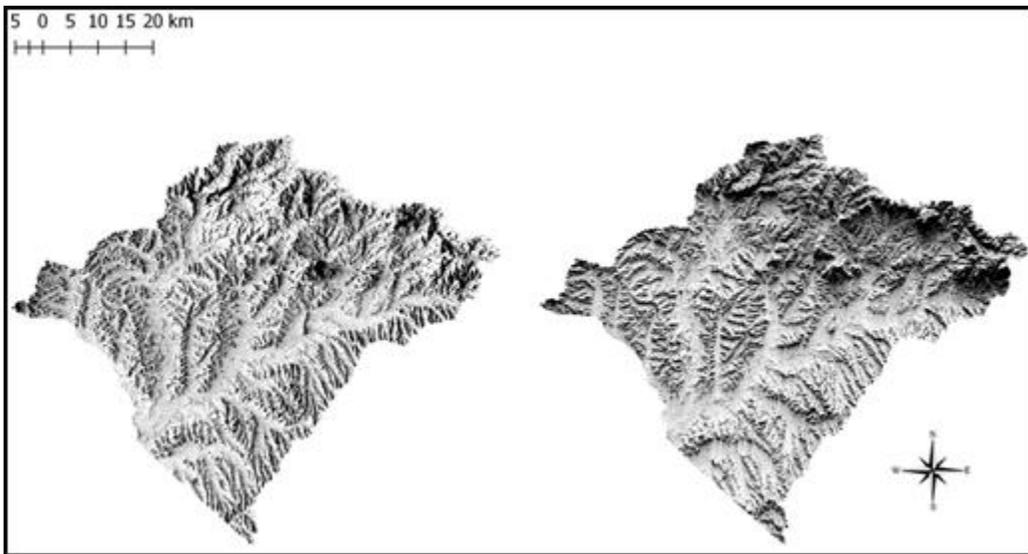


Figura 17- Altura do ângulo do horizonte para; $\theta=90^\circ$ (esquerda) e 180° (direita).

Fonte: O Autor

Os códigos usados para obter os mapas de entrada do r.sun estão no apêndice.

5.2. Geração dos dados de saída

De posse dos parâmetros de entrada, foi possível utilizar o modelo r.sun para realizar as simulações da irradiação global diária e dos mapa de insolação. Na figura 18, mostra-se a interface gráfica do r.sun com valores de entrada necessários para a simulação da radiação solar global para o dia 15 de fevereiro.

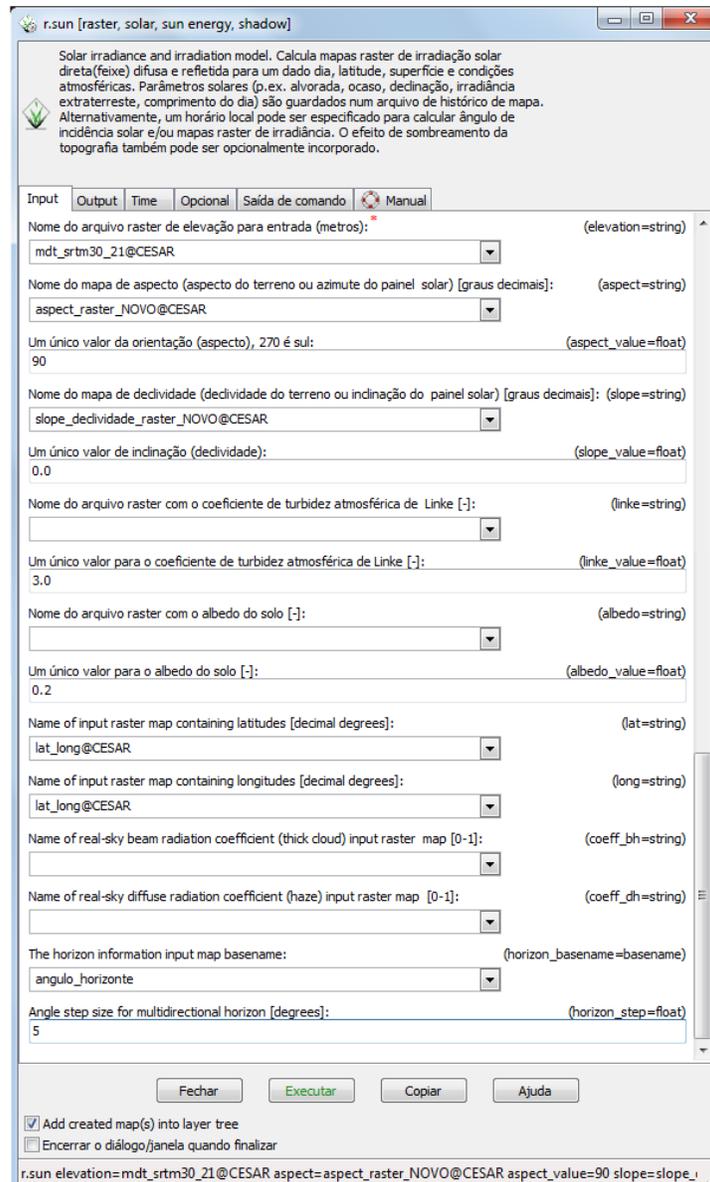


Figura 18- Interface do r.sun com os dados de entrada para o calculo da radiação global

Fonte: O Autor

É importante lembrar que o valor de orientação deve ser de 90°, pois o GRASS adota como padrão 270°, porém, este é o valor da inclinação para o sul (padrão para o hemisfério norte).

Já a figura 19 mostra os dados de saída para o cálculo da radiação global no r.sun.

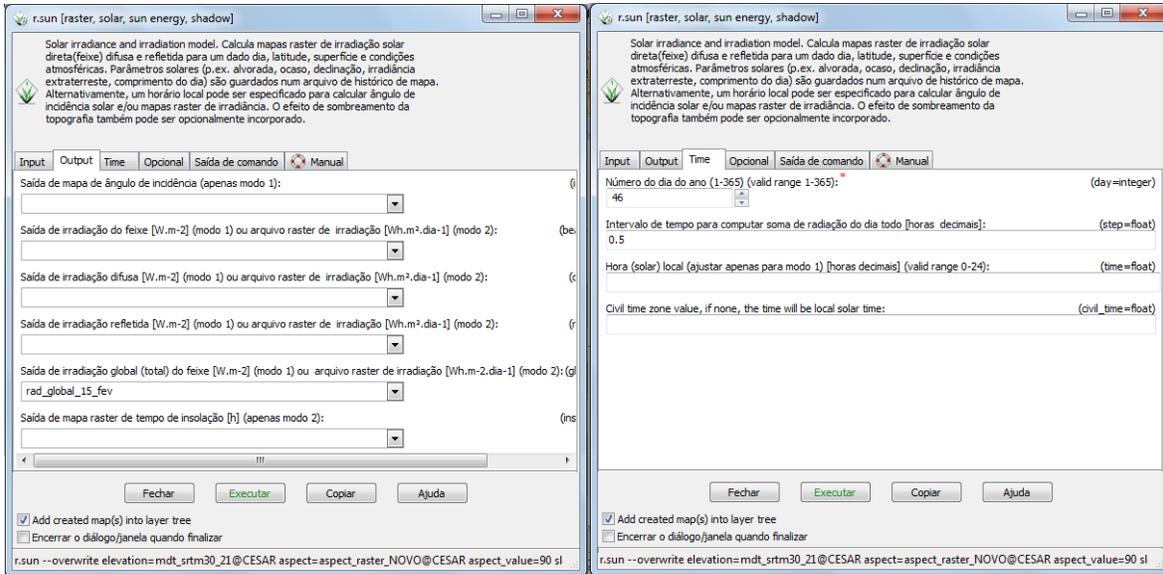


Figura 19- Interface do r.sun com os dados de saída para o calculo da radiação global

Fonte: O Autor

Quem define a data é o parâmetro *time* que utiliza o dia juliano do ano. A tabela 5 contem os valores deste parâmetro que foram utilizados para se obter os valores das simulações no r.sun.

Tabela 5 – Dias julianos utilizados para as simulações

Dia Juliano	Calendário Gregoriano	
Time	Dia	Mês
15	15	Janeiro
45	15	Fevereiro

74	15	Março
105	15	Abril
135	15	Maio
166	15	Junho
196	15	Julho
227	15	Agosto
258	15	Setembro
288	15	Outubro
319	15	Novembro
349	15	Dezembro
355	21	Dezembro/Solstício Verão
172	21	Junho/Solstício Inverno
81	22	Março/Equinócio Outono
265	22	Setembro/ Equinócio Primavera

Primeiramente buscou-se simular os parâmetros solares para todo dia 15 de cada mês, então de posse de 12 mapas mensais, fez-se uma média dos parâmetros para o ano inteiro e para cada estação.

Os códigos fontes para a geração estão no apêndice.

5.2.1. Geração dos mapas de estimativa da irradiação global diária

O primeiro passo foi gerar os mapas que estimam a irradiação global diária para as estações do ano. As figuras 20 a 27 mostram a irradiação solar global para cada estação na Bacia do Rio Negro com seus respectivos histogramas, onde cada um contém a distribuição espacial dos pixels no SRTM.

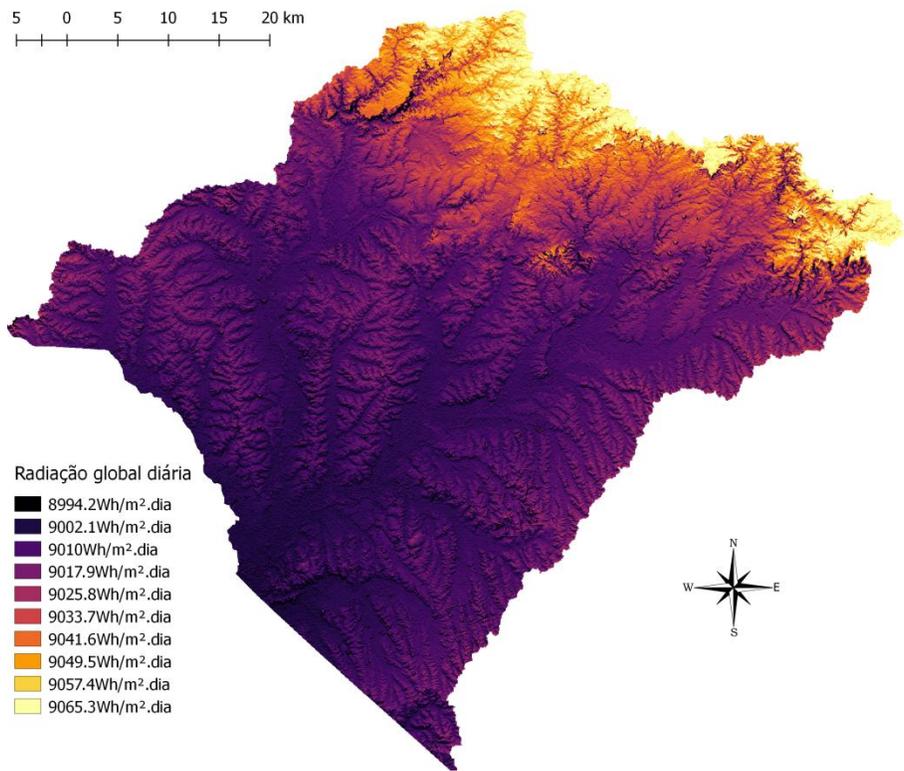


Figura 20 – Estimativa da irradiação global diária para o verão

Fonte: O autor

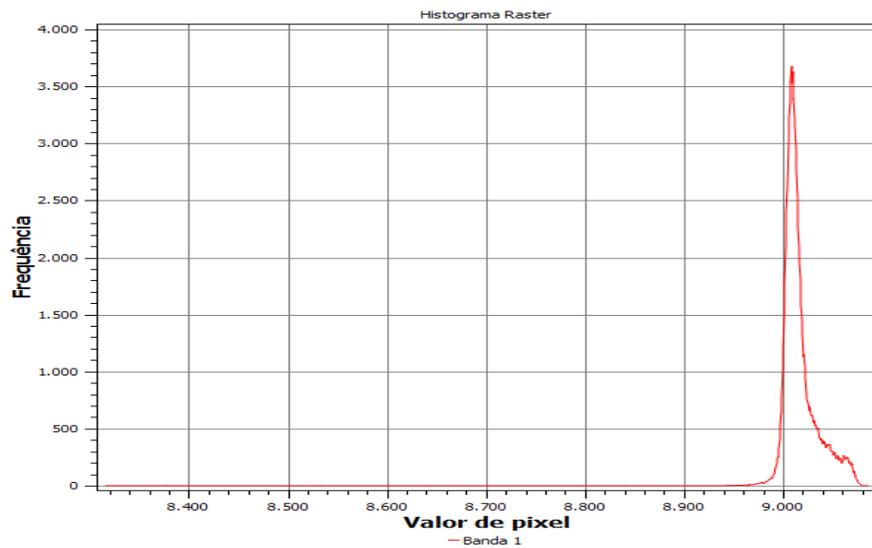


Figura 21 – Histograma do mapa da estimativa da irradiação global diária para o verão

Fonte: O autor

Analisando a figura 20 nota-se que a radiação global média está um pouco acima de $9000\text{Wh/m}^2\text{dia}$ e que a área que apresentou os maiores índices de radiação foi a porção norte da bacia.

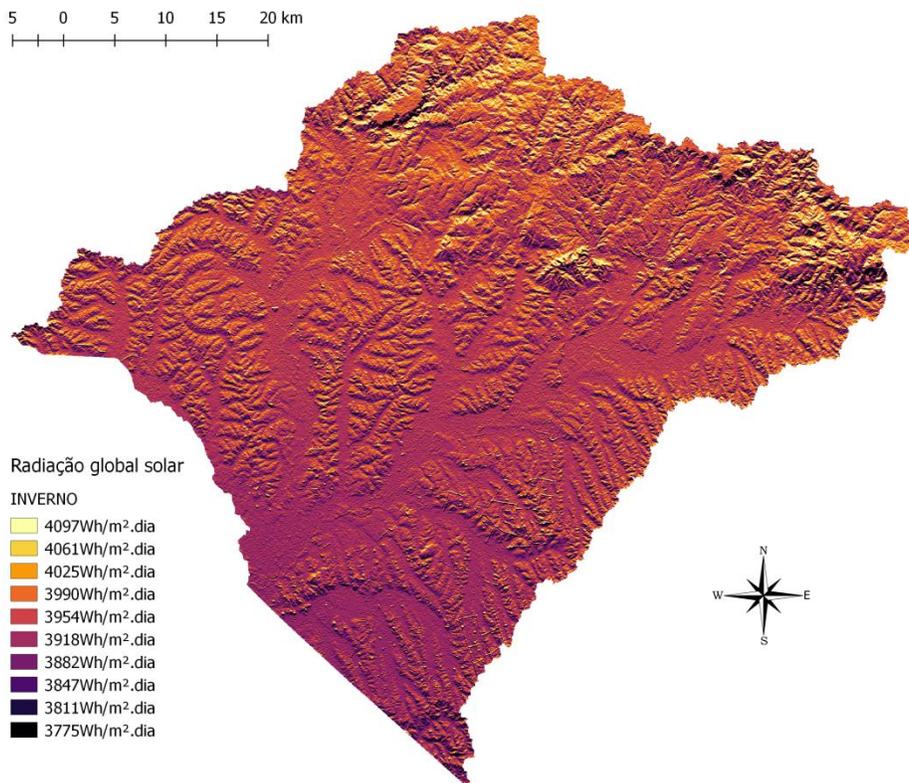


Figura 22 – Estimativa da irradiação global diária para o inverno

Fonte: O autor

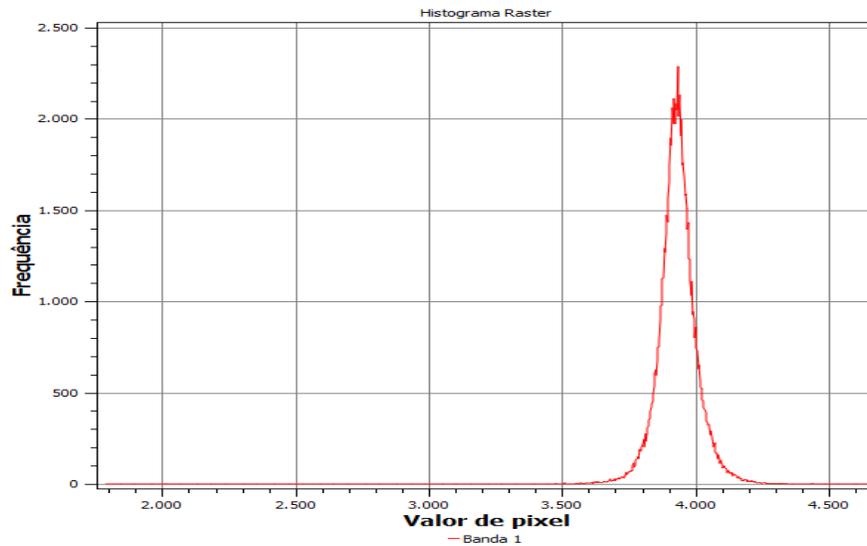


Figura 23 – Histograma do mapa da estimativa da irradiação global diária para o inverno

Fonte: O autor

Analisando a figura 22 nota-se que a radiação global média para o verão está um pouco abaixo de $4000\text{Wh/m}^2\text{dia}$ e que a área que apresentou os maiores índices de radiação foi a porção norte da bacia.

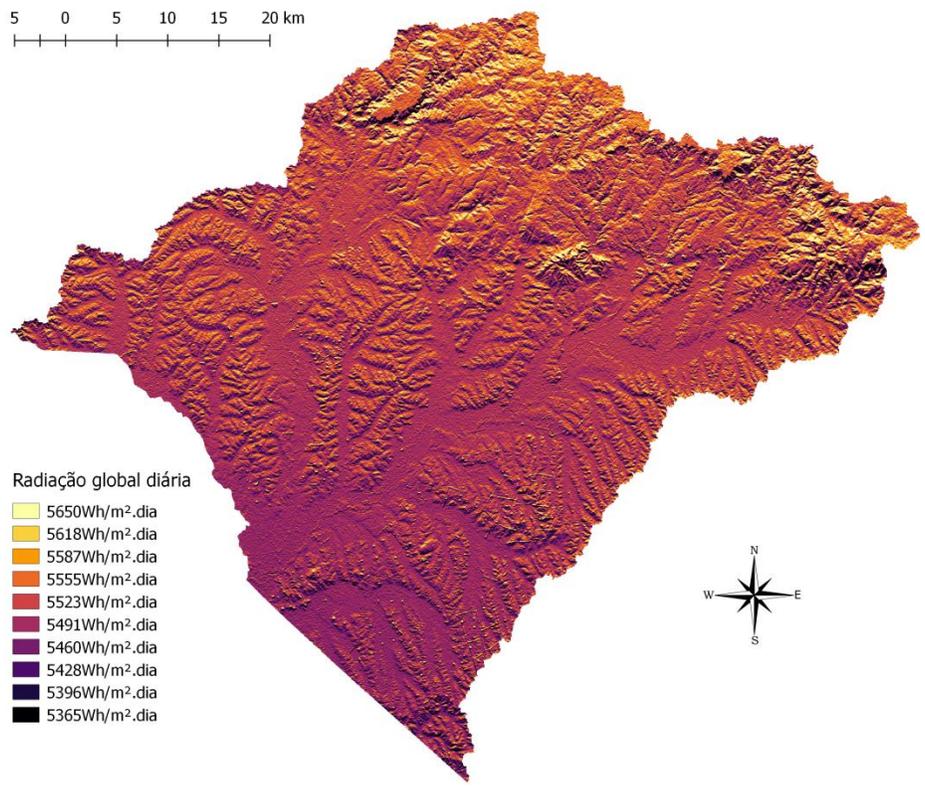


Figura 24 – Estimativa da irradiação global diária para o outono

Fonte: O autor

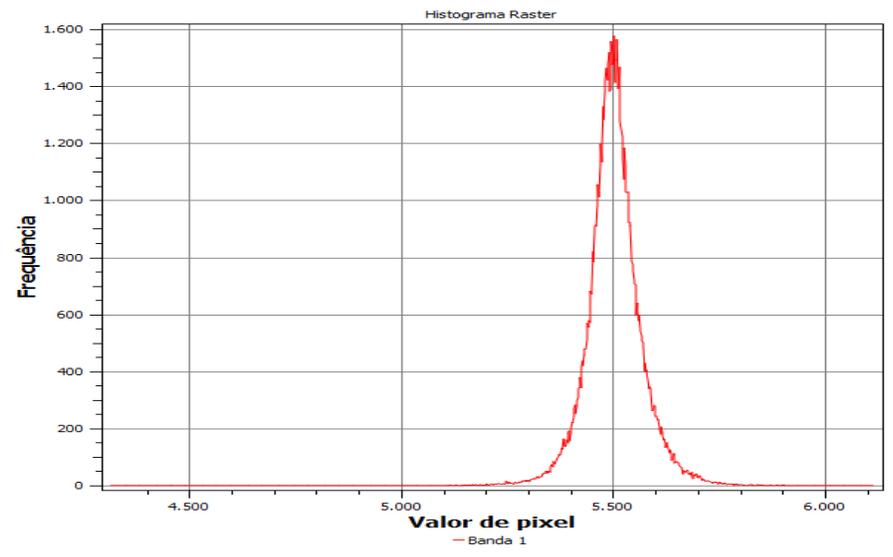


Figura 25 – Histograma do mapa da estimativa da irradiação global diária para o outono

Fonte: O autor

Pela figura 24 nota-se que a radiação global média para o outono está próxima de $5500\text{Wh/m}^2\text{dia}$ e que a área que apresentou os maiores índices de radiação também foi a porção norte da bacia.

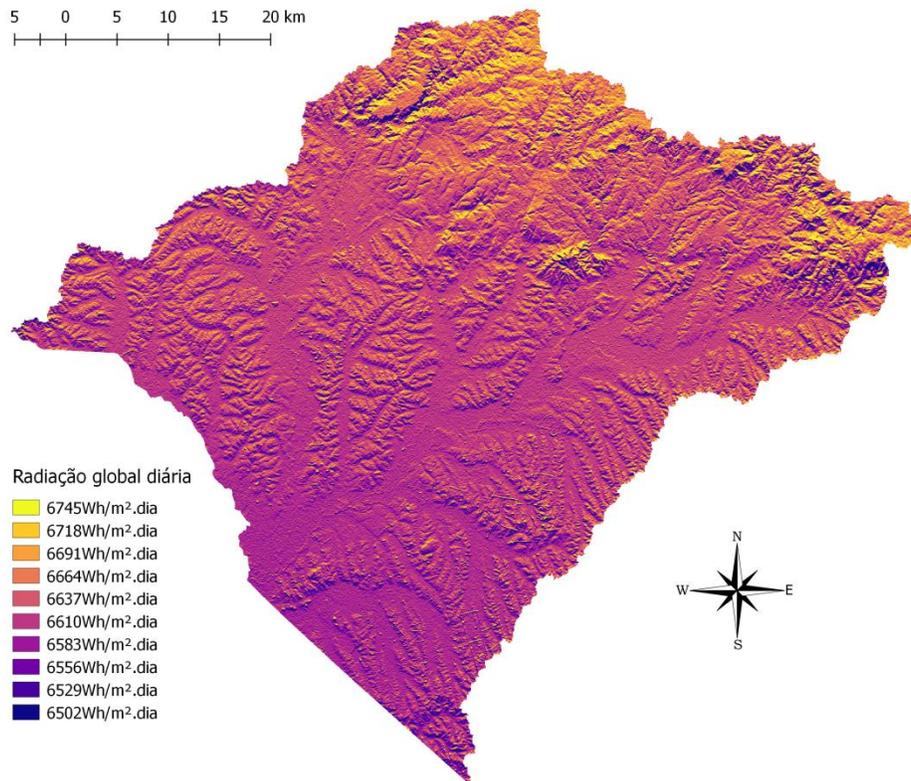


Figura 26 – Estimativa da irradiação global diária para primavera

Fonte: O autor

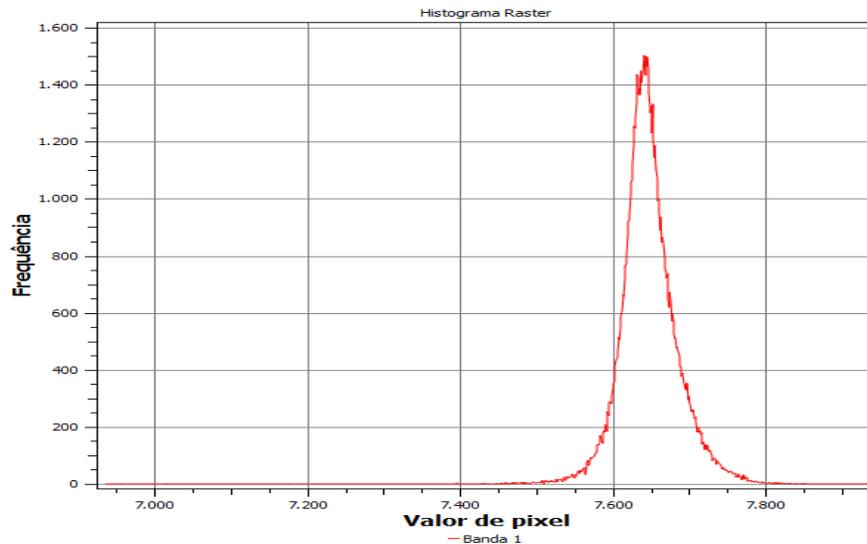


Figura 27– Histograma do mapa da estimativa da irradiação global diária para a primavera

Fonte: O autor

Analisando a figura 26 nota-se que a radiação global média se aproxima de 7700Wh/m²/dia e que a parte norte da bacia foi a que apresentou os maiores índices de radiação.

Ao fazer a análise dos mapas sazonais de radiação, nota-se a grande variação de radiação solar global que acontece do verão para o inverno, isso se deve a bacia estar localizada abaixo do Trópico de Capricórnio, recebendo assim uma taxa de insolação muito maior no verão se comparada ao inverno.

Logo após obtive a estimativa média da radiação global solar anual na bacia do Rio Negro, como demonstra a figura 28.

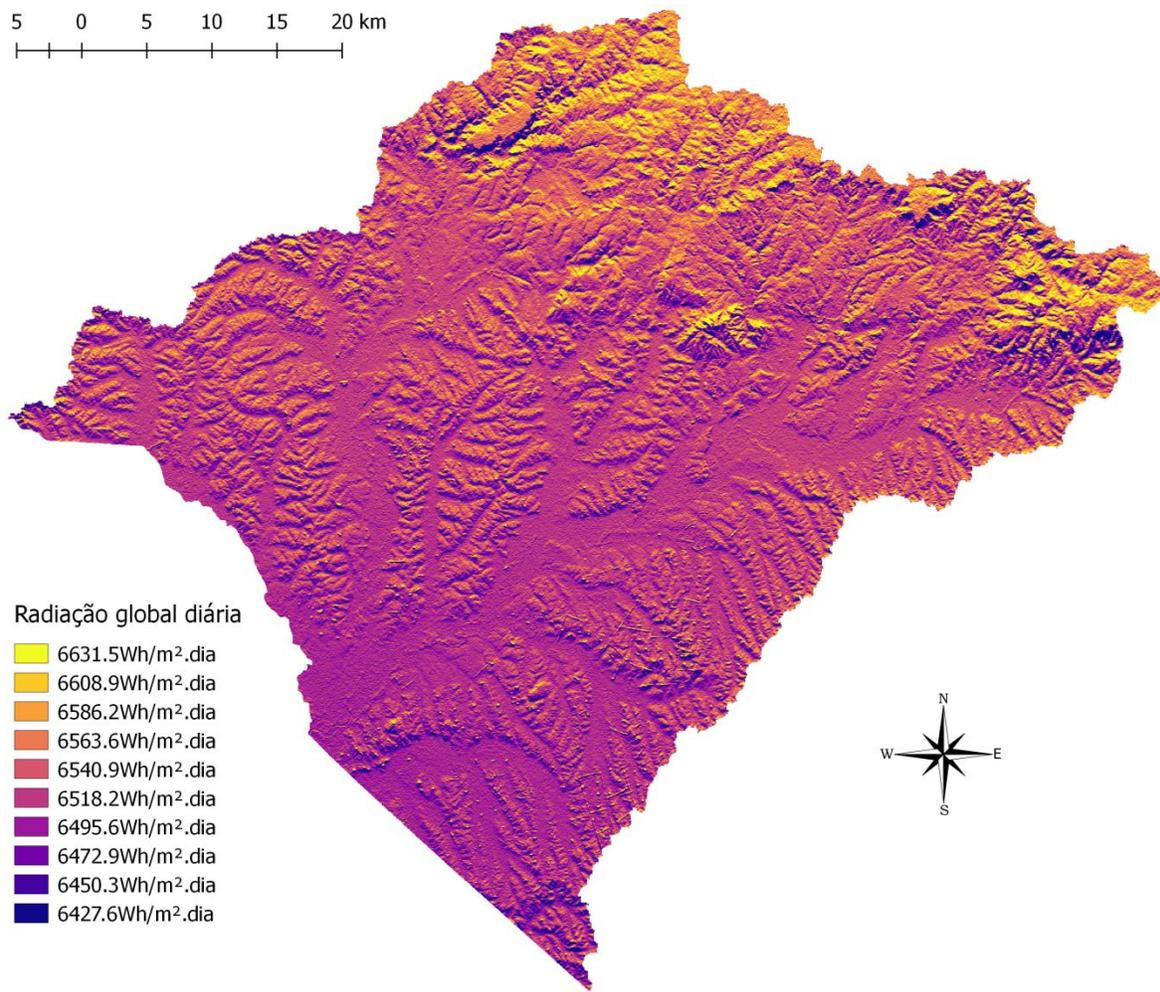


Figura 28 – Estimativa anual da irradiação global diária

Fonte: O autor

Já a figura 29 mostra o histograma do mapa anual da radiação global, mostrando a distribuição dos pixels do mapa.

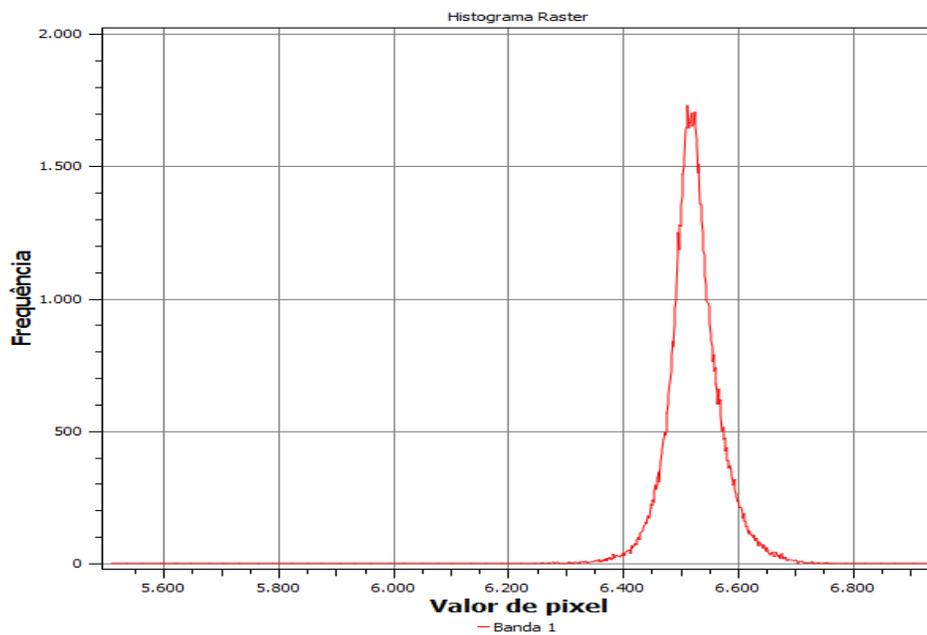


Figura 29 – Histograma do mapa da estimativa anual da irradiação global.

Fonte: O autor

Podemos notar na figura 28 que a radiação global média disponível esteve próxima de 6500 Wh/m²/dia e que o maior potencial está localizado no norte da bacia, porém é nessa mesma área em que estão as maiores variações de radiação, visto que a declividade dessa parte do terreno é um pouco mais acentuada ocorrendo assim períodos leves de sombreamento em alguns locais.

Em seguida se obteve os mapas de irradiação global diária para os dias do ano quando o ângulo de declinação é zero, ou seja, os equinócios de outono e primavera, como mostram as figuras 30 e 31.

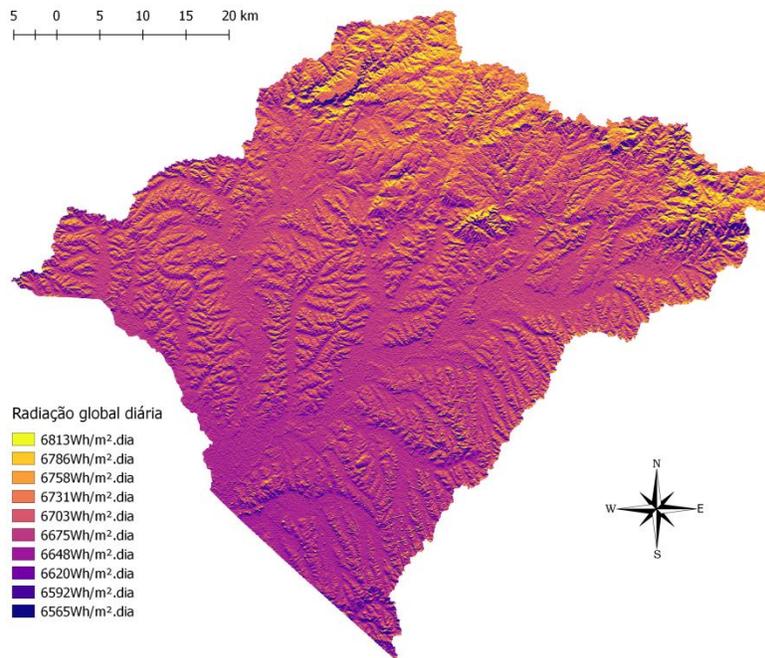


Figura 30 – Estimativa da irradiação global diária para equinócio do outono

Fonte: O autor

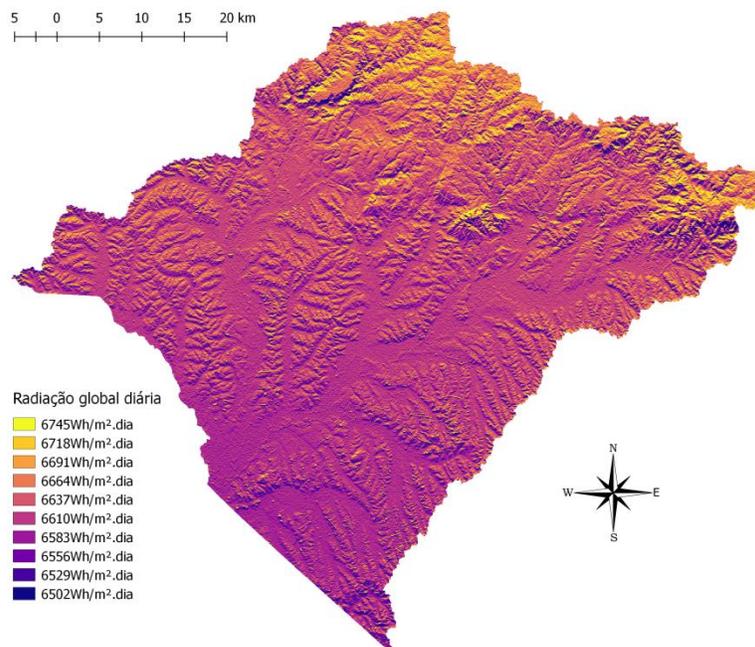


Figura 31 – Estimativa da irradiação global diária para equinócio da primavera

Fonte: O autor

Na figura 30 se nota que os valores da radiação solar global diária para os equinócios se assemelharam e se aproximaram de $6600\text{Wh/m}^2\text{dia}$. Essa semelhança como já foi dito anteriormente se deve ao ângulo de declinação (δ) que é praticamente o mesmo.

Por fim determinaram-se as estimativas de máxima e mínima radiação solar global diária na Bacia Hidrográfica do Rio Negro. Para isso foi necessário aplicarmos no modelo r.sun as datas do solstício de verão e de inverno. A figura 32 mostra a menor taxa disponível de radiação na bacia durante o ano que ocorre no solstício de inverno.

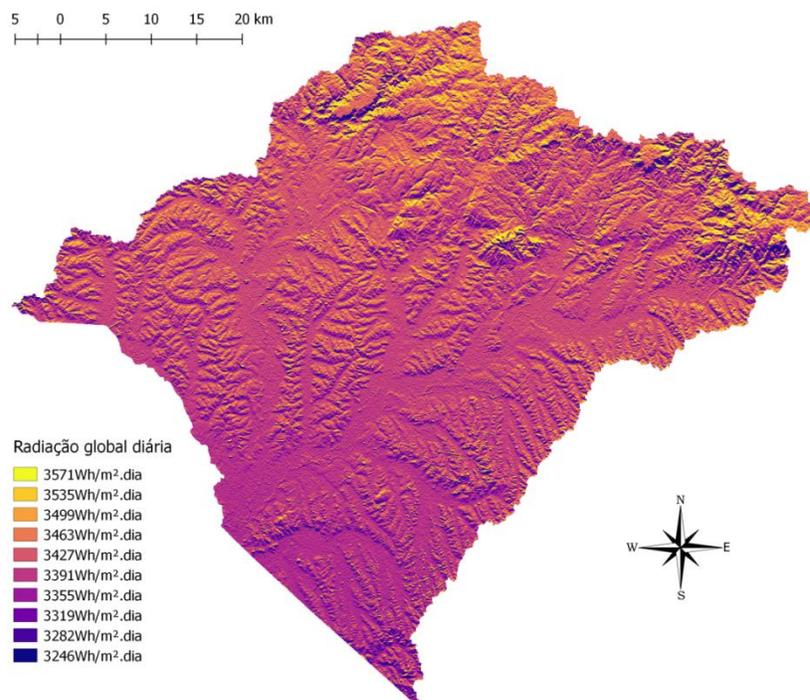


Figura 32 – Estimativa da irradiação global diária para o solstício de inverno

Fonte: O autor

Pela figura 31, notamos que a menor taxa de radiação disponível na bacia durante ao ano se aproxima de $3500\text{Wh/m}^2\text{dia}$.

Após se determinou a maior estimativa de radiação global diária disponível na bacia durante o ano, simulando r.sun para o solstício de verão. A figura 33 nos mostra esse resultado.

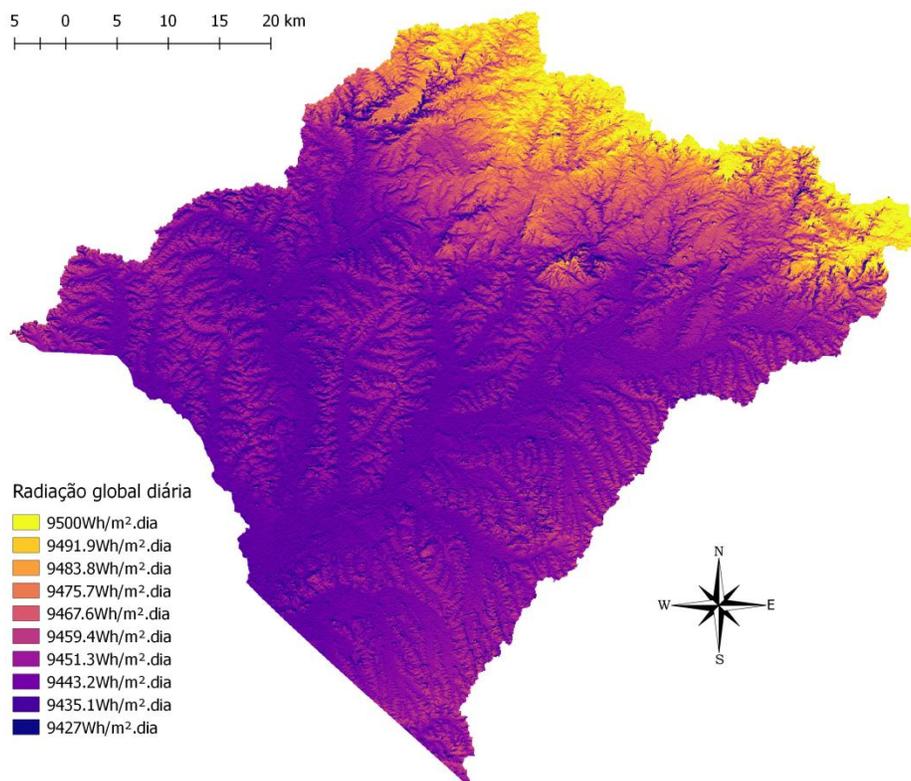


Figura 33 – Estimativa da irradiação global diária para o solstício de verão.

Fonte: O autor

Pela figura 33, notamos que a maior taxa de radiação disponível na bacia durante ao ano se aproxima de 9500Wh/m².dia.

Os mapas da estimativa de irradiação global diária para o dia 15 de cada mês estão organizados no apêndice.

5.2.2. Geração dos mapas de insolação

Após realizar a estimativa da radiação global, o próximo passo foi a obtenção de outro importante parâmetro solar, os mapas de insolação diária. Este parâmetro

nos mostra o tempo de luz solar incidente sobre a bacia e os pontos de maior exposição ao sol. Os mapas de insolação foram divididos de acordo com as estações do ano, conforme se mostra nas figuras 34 a 37.

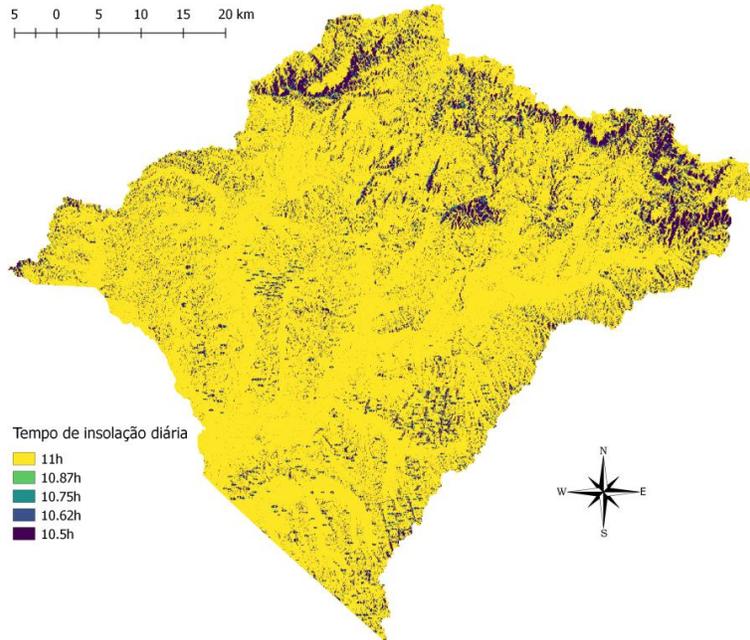


Figura 34 – Tempo de insolação para o outono.

Fonte: O autor

Na figura 34 vemos que para o outono se verificou que o tempo de sol na bacia é próximo de 11 horas diárias.

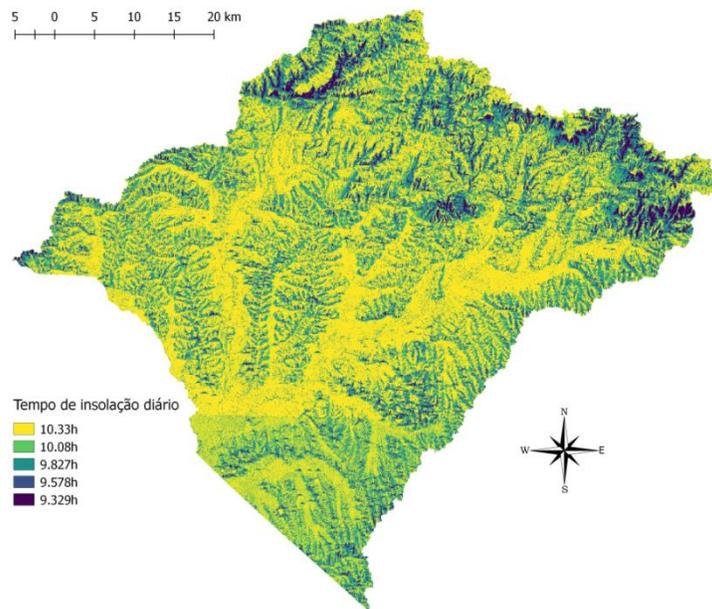


Figura 35– Tempo de insolação para o inverno.

Fonte: O autor

Analisando a figura 35 notamos que para o inverno o tempo de sol na bacia variou de 10,3 a 9,3 horas diárias de a luz solar.

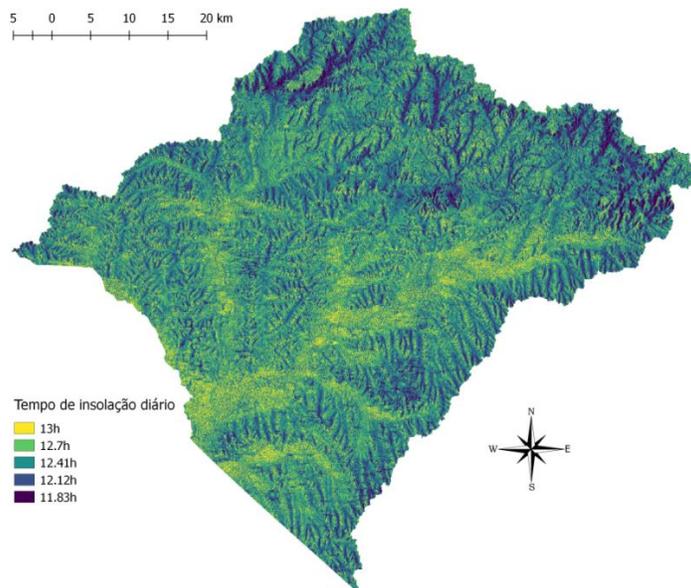


Figura 36 – Tempo de insolação para a primavera.

Fonte: O autor

O tempo de insolação para a primavera visto na figura 36, nos diz que o tempo de sol na bacia nessa estação varia de 12 a 13 horas aproximadamente.

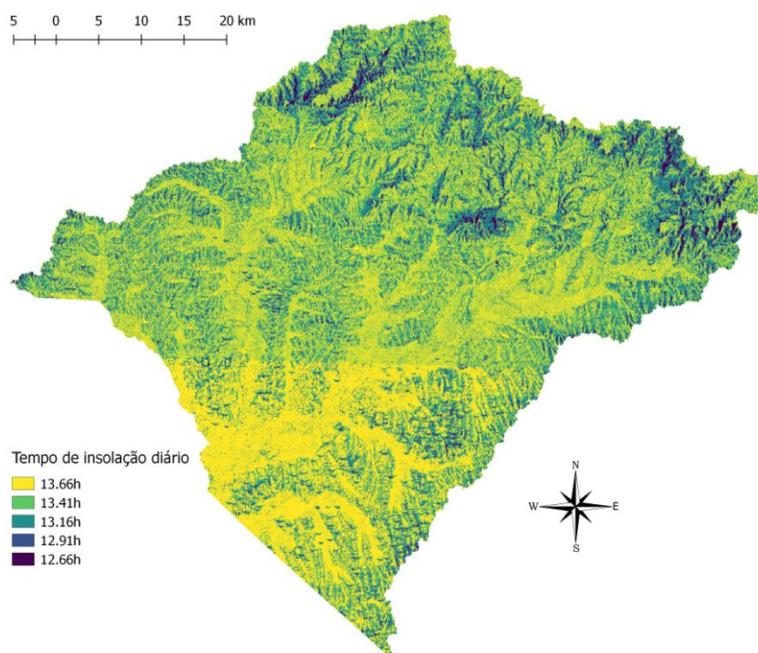


Figura 37 – Tempo de insolação para o verão.

Fonte: O autor

Na figura 37 vemos que para o verão se verificou que o tempo de sol na bacia variou de 13,6 até 12,6 horas diárias. Ainda pode-se notar ao analisar os mapas de insolação que as partes que receberam a menor insolação são exatamente as que possuem a maior taxa de declividade.

5.3. Comparação com os dados da estação INMET/Bagé

Com a finalidade de comprovar os dados resultantes do r.sun foi realizada a sua comparação com os dados da estação meteorológica automática Bagé-A827 do INMET. Os dados para comparação foram extraídos do dia 15 de cada mês para o ano de 2012, e a tabela 6, compara os dados simulados e reais.

Tabela 6 – Comparação dos dados de irradiação global diária para os meses do ano

Irradiação global diária (Wh/m².dia)

Mês	Dia	Dados INMET	Dados r.sun	Diferença (%)
Janeiro	15	8834,504	9273,025	4,96
Fevereiro	15	7700,519	8372,49	8,73
Março	15	6529,949	7057,225	8,07
Abril	15	4612,64	5397,97	17,03
Maiο	15	4338,243	4067,965	-6,23
Junho	15	3005,774	3429,735	14,10
Julho	15	3618,124	3662,55	1,23
Agosto	15	4367,978	4716,485	7,98
Setembro	15	5799,129	6259,38	7,94
Outubro	15	7065,42	7770,315	9,98
Novembro	15	8161,934	8934,46	9,46
Dezembro	15	9284	9439,95	1,68

Pela tabela 6, pode-se verificar que a maior diferença foi em relação ao mês de abril seguido pelo mês de junho, já o mês de maio foi o único em que a medida real foi maior que a simulada.

Em seguida foram realizadas as comparações dos dados reais com os simulados, para os extremos (solstício de verão e solstício de inverno) e para os equinócios e os resultados foram organizados na tabela 7.

Tabela 6 – Comparação dos dados de irradiação global diária para equinócios e solstícios

Irradiação global diária (Wh/m².dia)					
	Mês	Dia	Dados INMET	Dados r.sun	Diferença (%)
Equinócio de outono	Março	22	5009,26	6689,16	33,54
Equinócio da primavera	Setembro	22	6025,052	6623,455	9,93
Solstício de verão	Junho	21	9542,42	9463,68	-0,83
Solstício de inverno	Dezembro	21	3456,637	3408,68	-1,39

Podemos notar na tabela 7 que a maior diferença ocorreu no equinócio de outono e que foi relativamente grande em relação a todos os outros dados comparados. Em ambos os solstícios o valor observado na estação climatológica superou um pouco a simulação no modelo r.sun.

6. CONCLUSÃO

O r.sun é um modelo de radiação solar totalmente integrado ao ambiente de origem do SIG GRASS. É especialmente adequado para a modelagem de grandes áreas com terrenos complexos porque todos os parâmetros espacialmente variáveis podem ser definidos como mapas matriciais.

O modelo pode ser facilmente utilizado para cálculos de longo prazo em escalas diferentes. Possui dois modos de operação que permitem ao usuário trabalhar separadamente ou em combinação com a variabilidade temporal da energia solar dentro de um dia ou dentro de um ano. Esses recursos oferecem ampla variedade de aplicações possíveis.

A principal dificuldade encontrada na utilização do *GRASS* foi que além dele exigir um grau intermediário de conhecimentos cartográficos e de linguagem computacional, pois, sua interface não é muito simpática se comparada a outros *softwares* da área, também a inexistência de uma bibliografia em português para aplicações do r.sun e outras extensões

Utilizando a metodologia proposta, foi possível estimar a distribuição espacial da radiação global diária e da insolação diária para a área de abrangência da bacia hidrográfica do Rio Negro-RS.

A estimativa média máxima para a bacia é de 9463,68 Wh/m²dia, sendo a mínima de 3408,68 Wh/m²di

A diferença entre os valores reais medidos pela estação do INMET e os valores obtidos através das simulações no r.sun, se deve principalmente por este software ter trabalhado com a condição de céu claro sempre, ou seja, não se estipulou dias de nebulosidade e nem dias chuvosos (Não levando em consideração o parametro de entrada Turbidez Linke). Exceto o equinócio de outono que mostrou uma diferença de mais de 30%, ocasionada provavelmente porque o dia apresentou períodos de nebulosidade, os outros dados comparados

apresentaram um resultado satisfatório se situando abaixo dos 10% provando que o modelo computacional se aproximou bastante da radiação global diária.

Ainda se notou que os dados reais da estação INMET para o mes de maio, solstício de verão e solstício de inverno superaram os valores simulados, isso pode ter ocorrido devido a diferença da transmissividade atmosférica real e a usada como padrão interno do modelo ou também porque a estação está localizada em um dos pontos de maior potencial disponível na bacia.

O LMSC pretende-se dar continuidade a pesquisa. Neste contexto, os próximos passos planejados são a simulação da radiação global diária para todos os dias do ano, em um período de três anos, e a comparação dos resultados com os dados registrados na estação do INMET. Também pretende-se identificar os locais com os maiores e menores resultados de potencial com relação a radiação global diária. Para tanto, se fará uso de procedimentos de análise espacial nos mapas de radiação global diária gerados. Pretende-se ainda publicar os resultados da pesquisa em anais de eventos nacionais e internacionais, bem como a produção de um artigo para periódico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira** Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, São Paulo, 2012.

ALDABÓ Ricardo. **Energia Solar** - 1ª edição, UFRGS, 2002.

ASTRO UFRGS Disponível em <http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm> acessado em 18/09/2016

BRITO Miguel Centeno, VALLÊRA António M. **Meio século de história fotovoltaica**. Lisboa, CMFC, 2004.

COMETTA Emílio. **Energia Solar – Utilização e empregos práticos**; Editora Hemus.

DANTAS Antônio Augusto Aguilar, De CARVALHO Luiz Gonsaga, NETO Pedro Castro. **Curso de Agrometeorologia**. UFLA, 2007.

DIENSTMANN, G. **Energia solar: Uma comparação entre tecnologias**, 2009.

ENERGIA SOLAR: <https://energiasolar2012.wordpress.com/historico-do-uso-do-sol/> acessado em 21/10/2016 as 10:38.

FREIRE Luiza Beana Chipansky. **Método para levantamento do potencial energético solar em campus universitário**. UFPR, 2013

*GeoModel s.r.o., M. Marečka 3, 841 07 Bratislava, Slovak Republic, <http://www.geomodel.sk> ** Department of Geography and Geoecology, Faculty of Humanities and Natural Science, European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. Proceedings of the *Open source GIS - GRASS users conference 2002* - Trento, Italy, 11-13 September 2002.

GUIMARÃES, S. **Mapeamento do potencial solar em ambiente urbano**, Universidade de Lisboa, 2014.

KRENZINGER Arno Rodrigo, BUGS Carvalho, **Laboratório de Energia Radiasol2: Software Para Sintetizar Dados De Radiação Solar**, UFRGS, 2010.

LEITE, M.A. **Impacto Ambiental do meio ambiente**. II Semana do meio ambiente UNESP, Ilha Solteira, junho 2005.

LODI Cristiane. **Perspectivas para a geração de energia elétrica no Brasil utilizando a tecnologia solar térmica concentrada**. UFRJ, 2011.

MARTINS Fernando Ramos; PEREIRA Enio Bueno; ECHER Mariza Pereira de Souza. **Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário - Projeto Swera**. Revista Brasileira de Ensino de Física vol.26 no.2 São Paulo 2004.

MEDEIROS Anderson. **Conheça melhor o Grass** disponível em :<http://andersonmedeiros.com/conheca-melhor-o-grass/> acessado em 29/10/2016 as 18:16.

MOTA Rogério, **Radiação no Corpo Negro**, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, São Paulo. 2008

PEREIRA Enio Bueno, MARTINS Fernando Ramos, de ABREU Samuel Luna, RÜTHER Ricardo. **Atlas brasileiro de energia solar**; São José dos Campos : INPE, 2006.

PIROLI Edson Luís. **Introdução ao Geoprocessamento**, Universidade Estadual Paulista, Ourinhos, São Paulo, 2010.

ROBERTO Pereira Antonio, ANGELOCCI Luiz Roberto, SENTELHAS Paulo Cesar. **Meteorologia Agrícola**. Piracicaba, São Paulo, 3ª edição, 2000.

RÜTHER Ricardo. **Livro de radiação** - Universidade Federal de Santa Catarina UFSC & Instituto para o Desenvolvimento das Energias Alternativas na América Latina IDEAL.

SANTIAGO Basílio, SALVIANO Adriano. Apostila de Astronomia **Geodésica: Posicionamento pelas Estrelas**. UFRGS.

SCHAFER, A. G. **Relatório da pesquisa: Desenvolvimento de uma base de dados para a bacia hidrográfica do Rio Negro-RS**. Relatório Fapergs/Picmel. Bagé, 2015.

SCHOFFEL, E.R. **Radiação solar**, UFPEL, 2009.

SEMA.Secretária Estadual do Meio Ambiente disponível em:http://www.sema.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu=58&cod_conteudo=6014 acessado em 26/10/2016 as 15:55.

SENTELHAS Paulo César, ANGELOCCI Luiz Roberto, PEREIRA Antônio Roberto. **Apostila de Meteorologia Agrícola**. Piracicaba, SP, 2000.

SOARES Clarissa. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando agua salgada, salobra e doce contaminada**. UFSC, 2004.

SOARES Mayara, de ALCANTARA Licinius Dimitri Sá. **Programa para o cálculo da variação da direção de incidência dos raios solares ao longo do ano**, Universidade Federal Rural da Amazônia, COBENGE, 2013.

TAVARES M. **Aprendendo sobre o Sol**, Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.

TIRADENTES, A.A.R. **Uso da energia solar para geração de eletricidade e para aquecimento de água**, Universidade Federal de Lavras, 2007.

WEBER, ELISEU JOSÉ. **Estimativa e mapeamento do potencial solar**, 2011.

APÊNDICE A

Códigos para gerar os parâmetros de entrada do r.sun no GRASS GIS:

- 1) Para gerar os mapas de aspecto e declividade:

```
r.slope.aspect          elevation=mdt_srtm30_21@CESAR
slope=slope_declividade_raster_NOVO aspect=aspect_raster_NOVO
```

- 2) Para gerar os mapas dos ângulos de altura do horizonte:

```
r.horizon --overwrite elevation=mdt_srtm30_21@CESAR direction=90 step=1 start=0
end=360 bufferzone=200 output=horangle
```

Códigos para gerar os parâmetros de saída do r.sun no GRASS GIS:

- 1) Código fonte usado para gerar o tempo de insolação para o dia 15 de março ($n_j=74$):

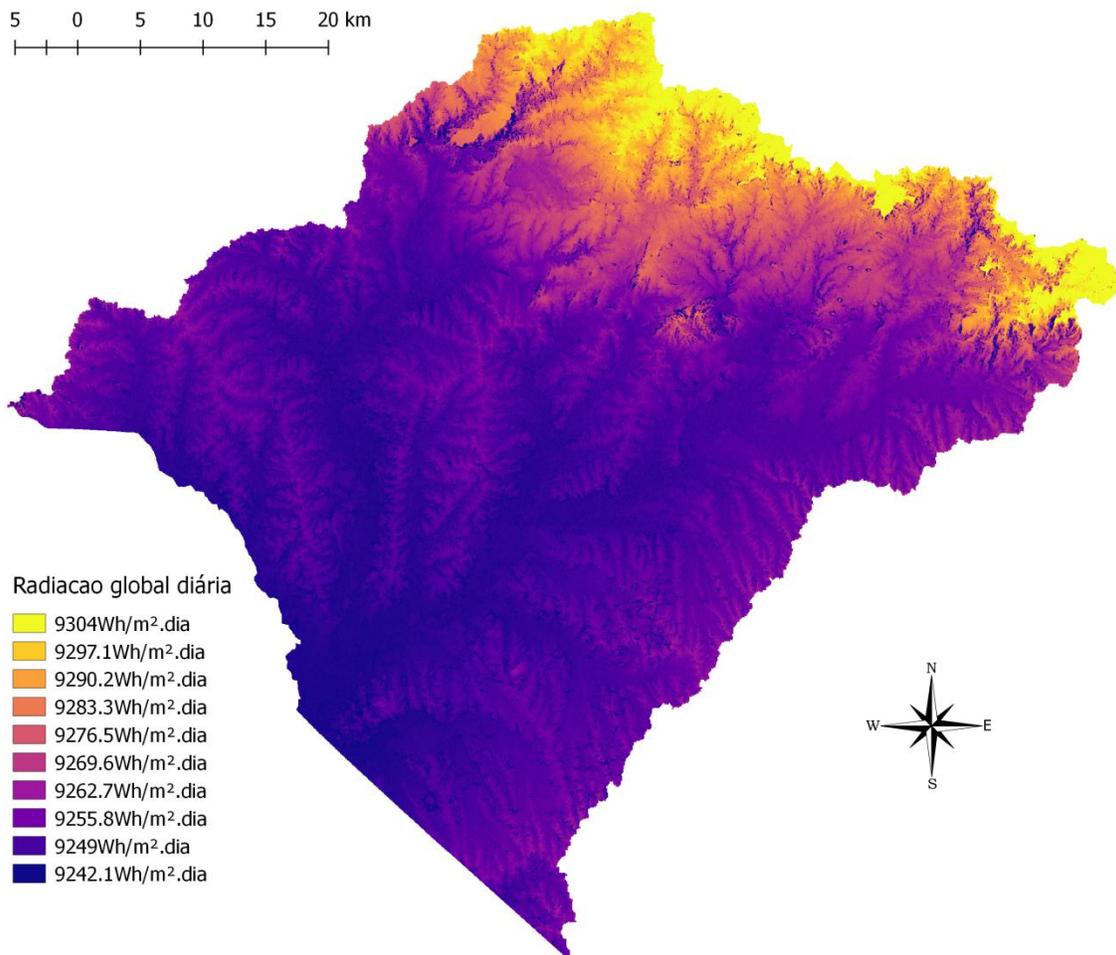
```
r.sun    elevation=mdt_srtm30_21@CESAR    aspect=aspect_raster_NOVO@CESAR
aspect_value=90 slope=slope_declividade_raster_NOVO@CESAR lat=lat_long@CESAR
long=lat_long@CESAR    horizon_basename=angulo_horizonte    horizon_step=5
insol_time=HORAS_SOL_15_MARCO day=74
```

- 2) Código fonte usado para gerar o mapa de irradiação global para o dia 15 de fevereiro ($n_j=46$):

```
r.sun    elevation=mdt_srtm30_21@CESAR    aspect=aspect_raster_NOVO@CESAR
aspect_value=90 slope=slope_declividade_raster_NOVO@CESAR lat=lat_long@CESAR
long=lat_long@CESAR    horizon_basename=angulo_horizonte    horizon_step=5
glob_rad=rad_global_15_fev day=46
```

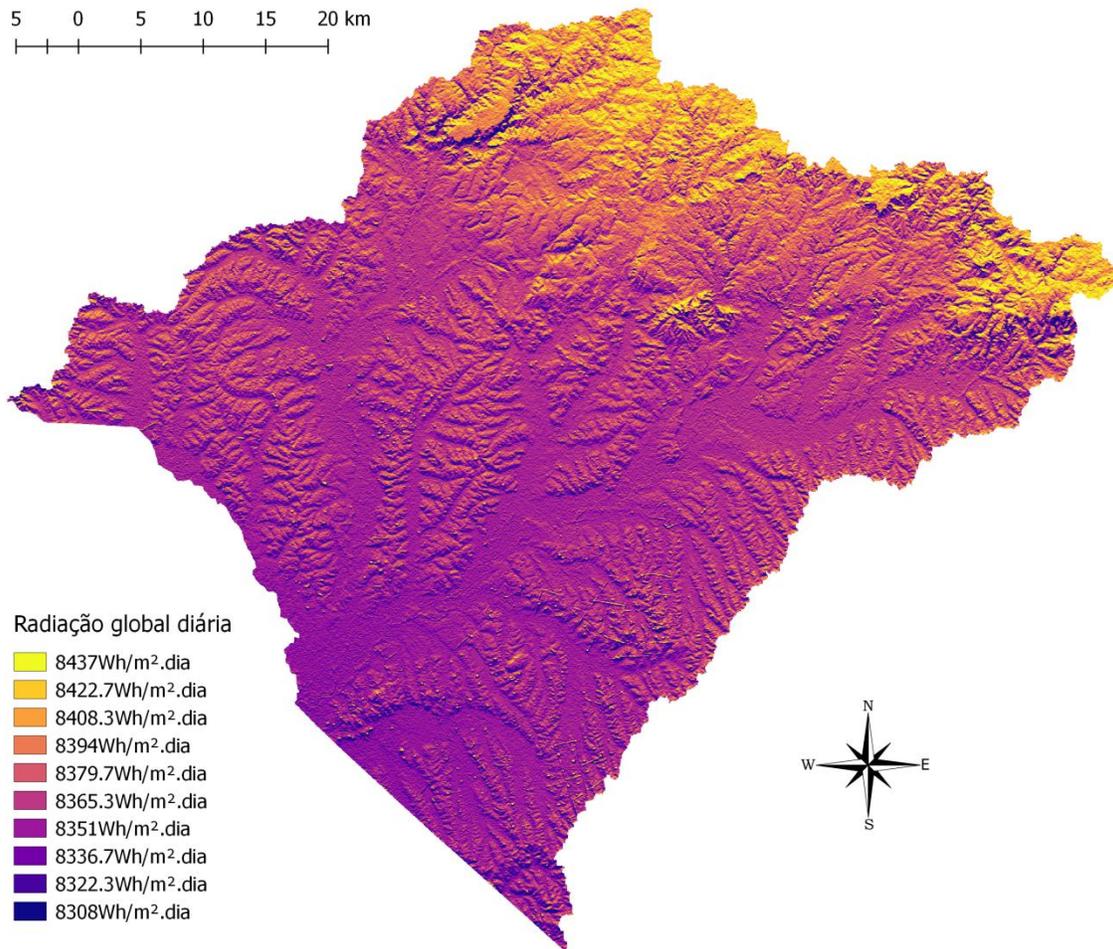
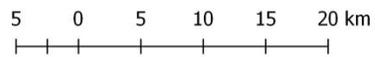
Aqui apresento os mapas de radiação global diária para o dia 15 de cada mês, usados para gerar os mapas de cada estação.

1) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de janeiro.

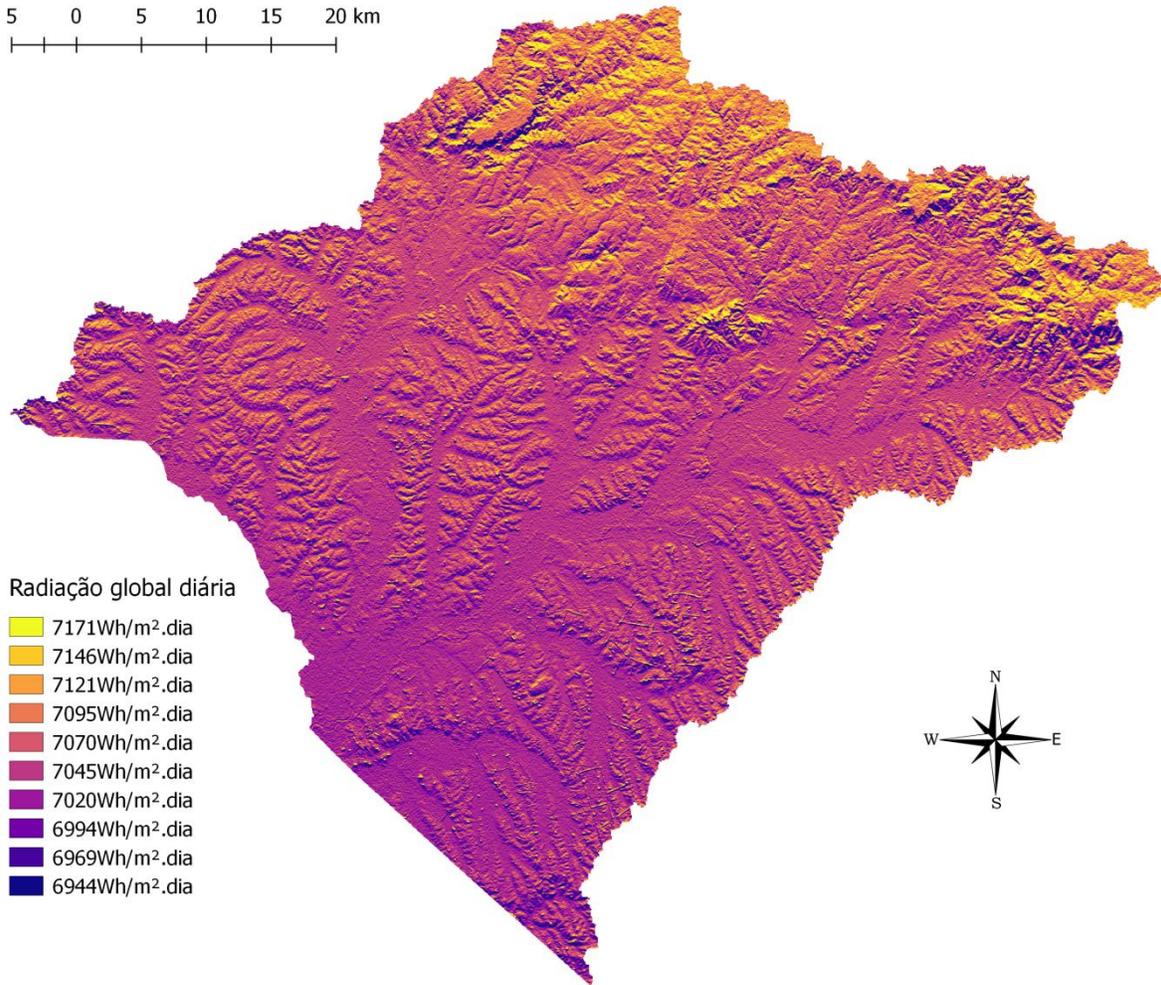
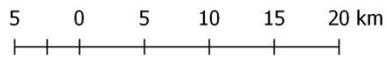


2) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de fevereiro

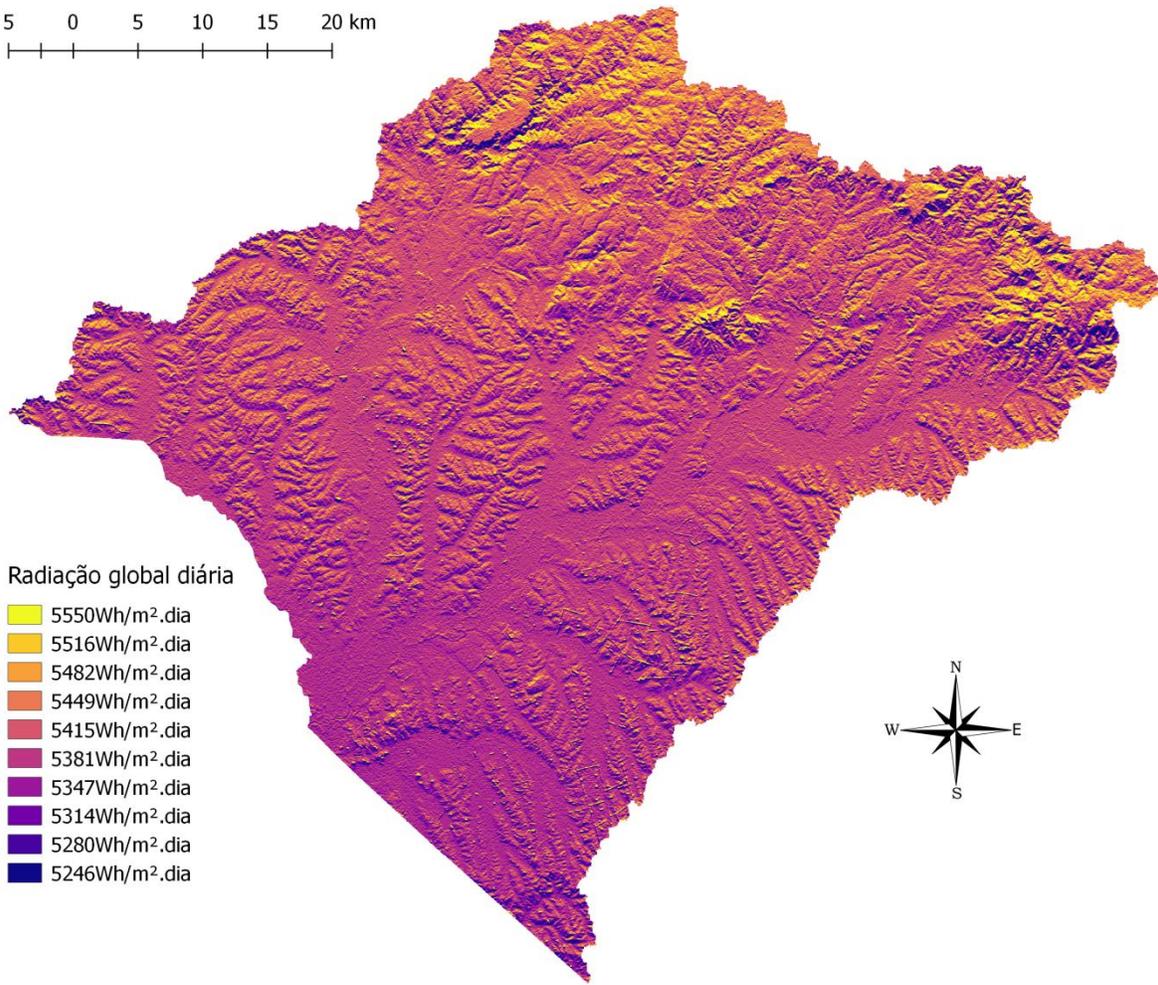
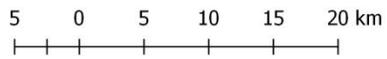
5 0 5 10 15 20 km



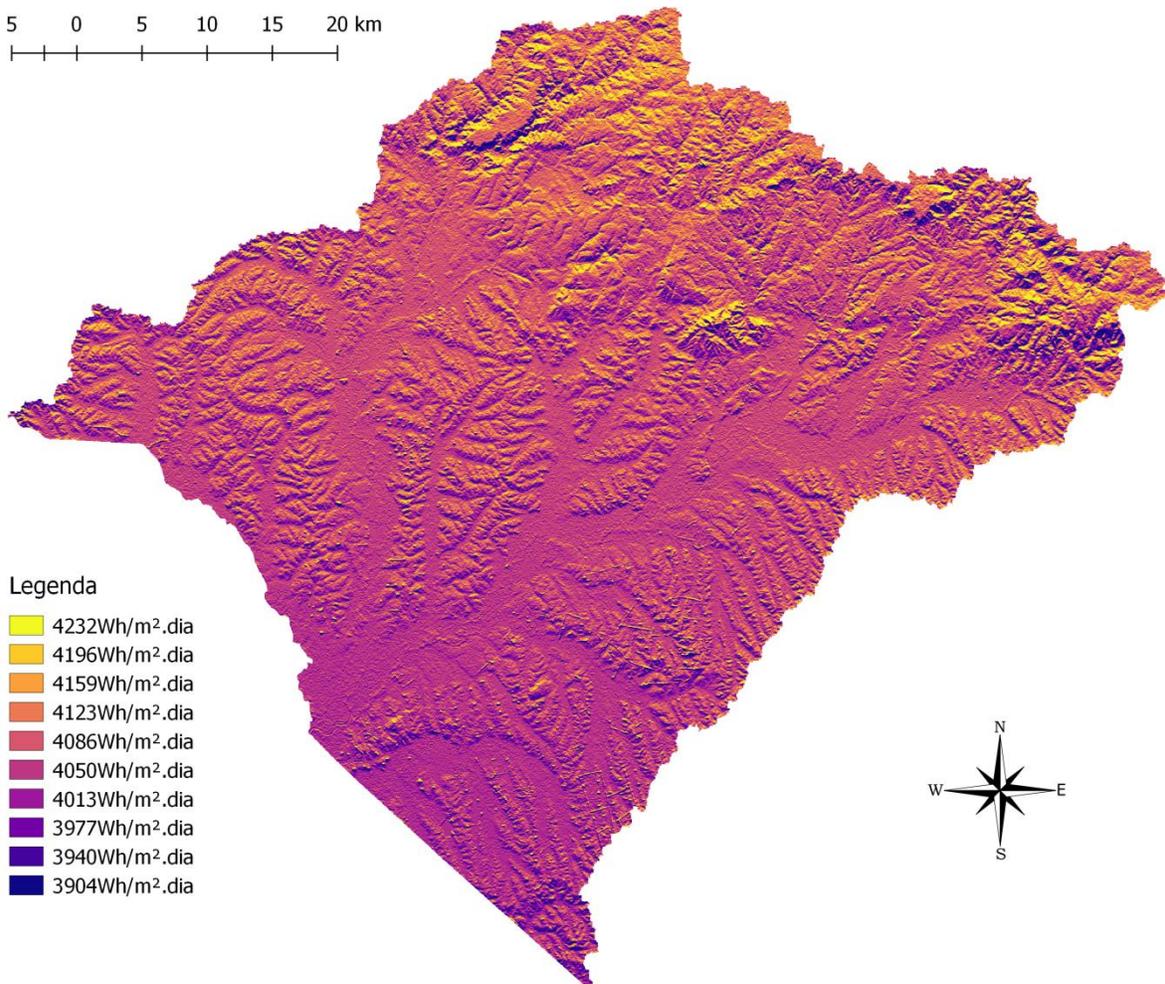
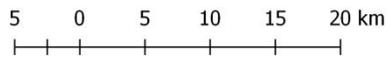
3) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de março.



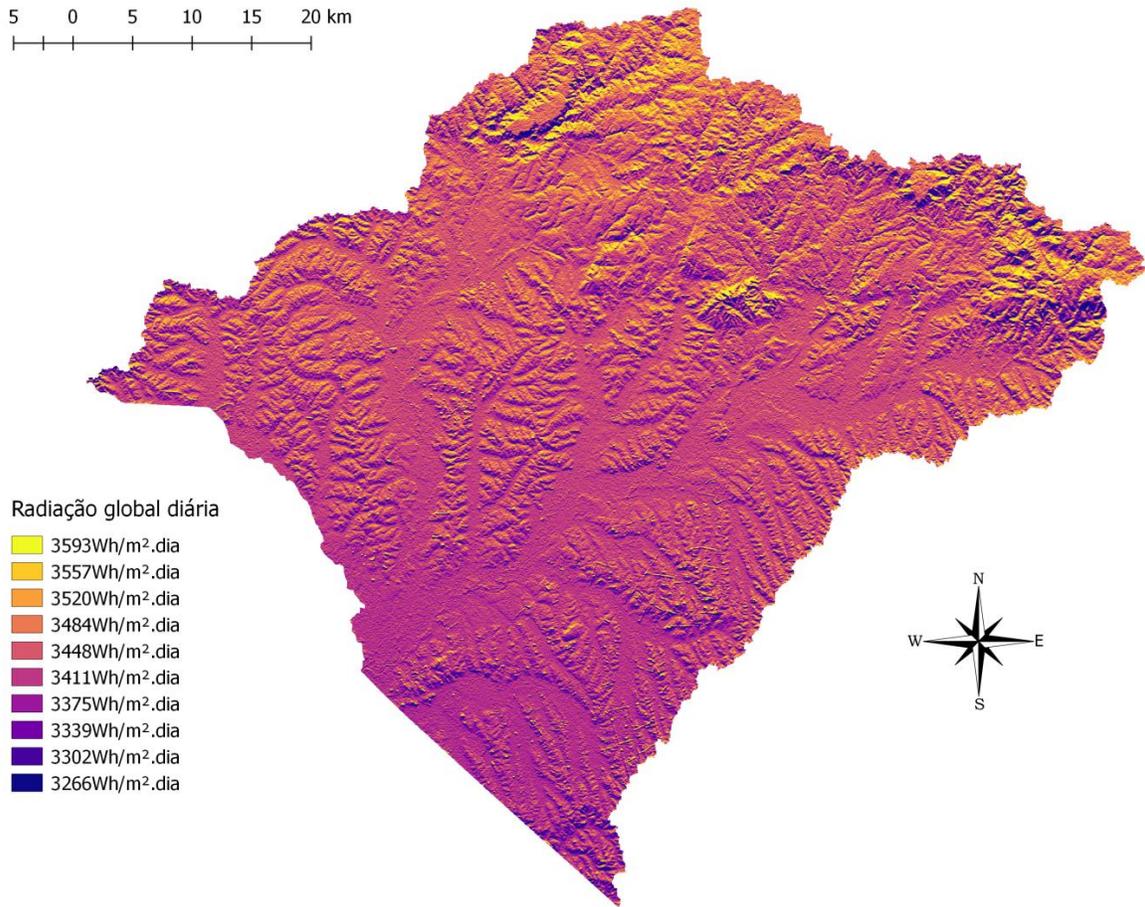
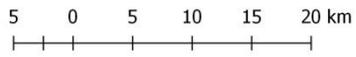
4) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de abril.



5) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de maio



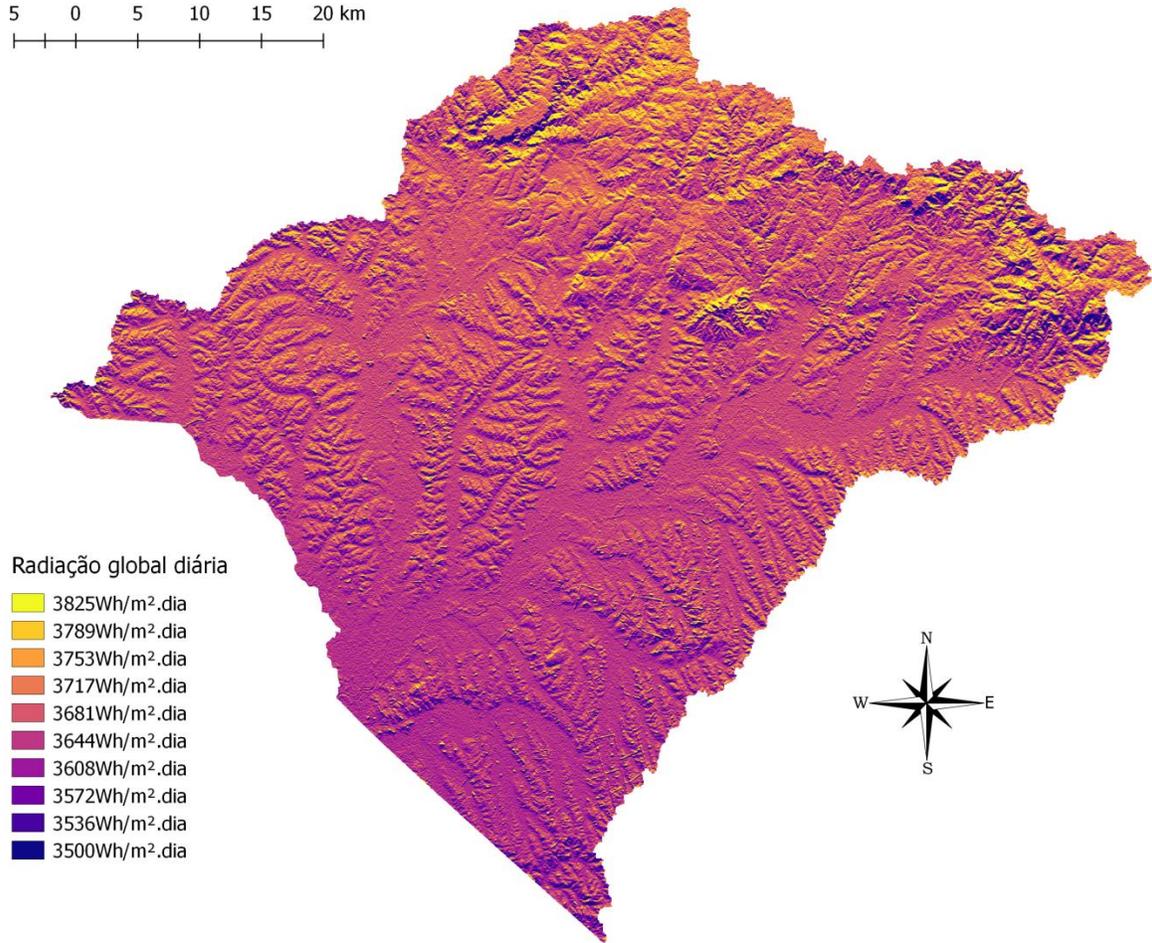
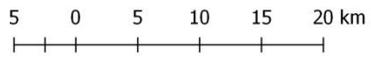
6) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de junho.



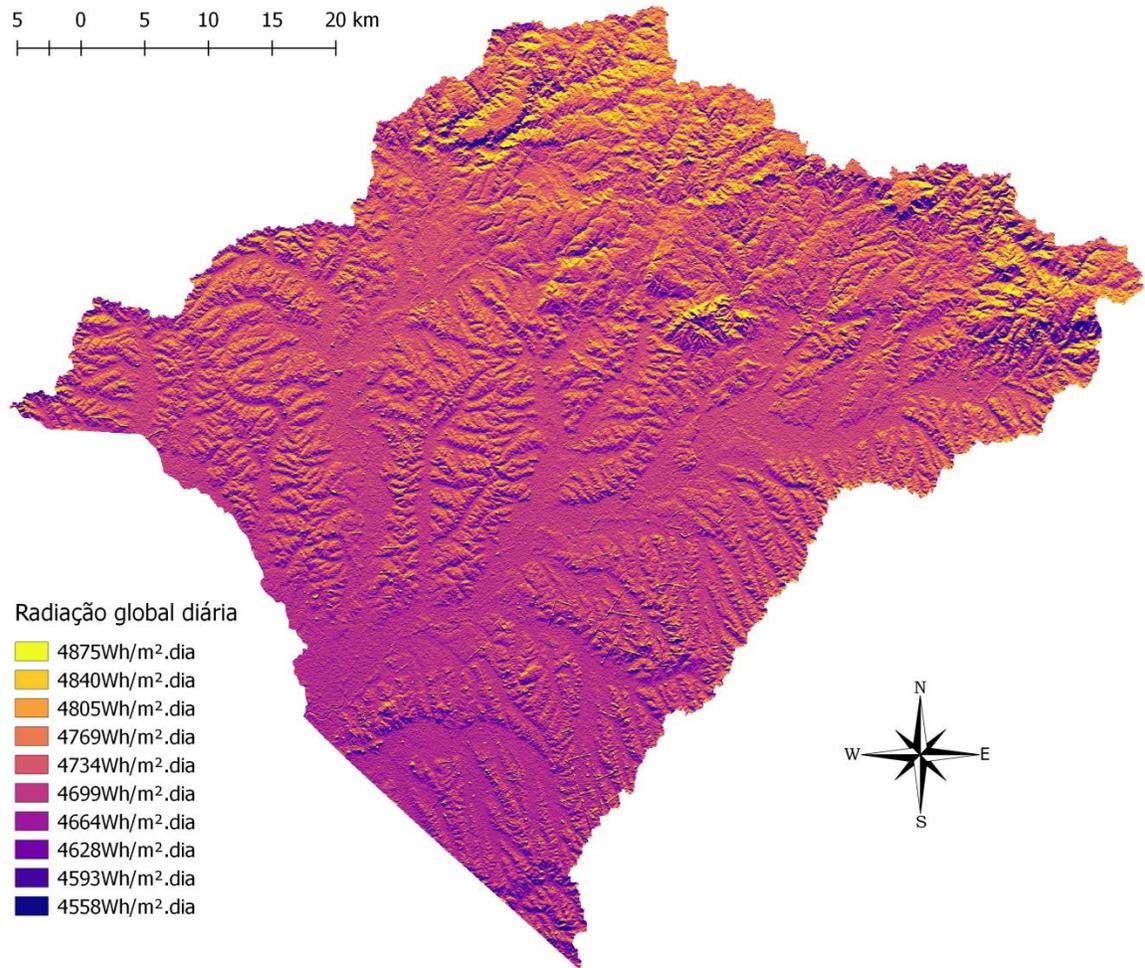
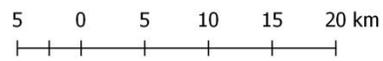
Radiação global diária

- 3593Wh/m².dia
- 3557Wh/m².dia
- 3520Wh/m².dia
- 3484Wh/m².dia
- 3448Wh/m².dia
- 3411Wh/m².dia
- 3375Wh/m².dia
- 3339Wh/m².dia
- 3302Wh/m².dia
- 3266Wh/m².dia

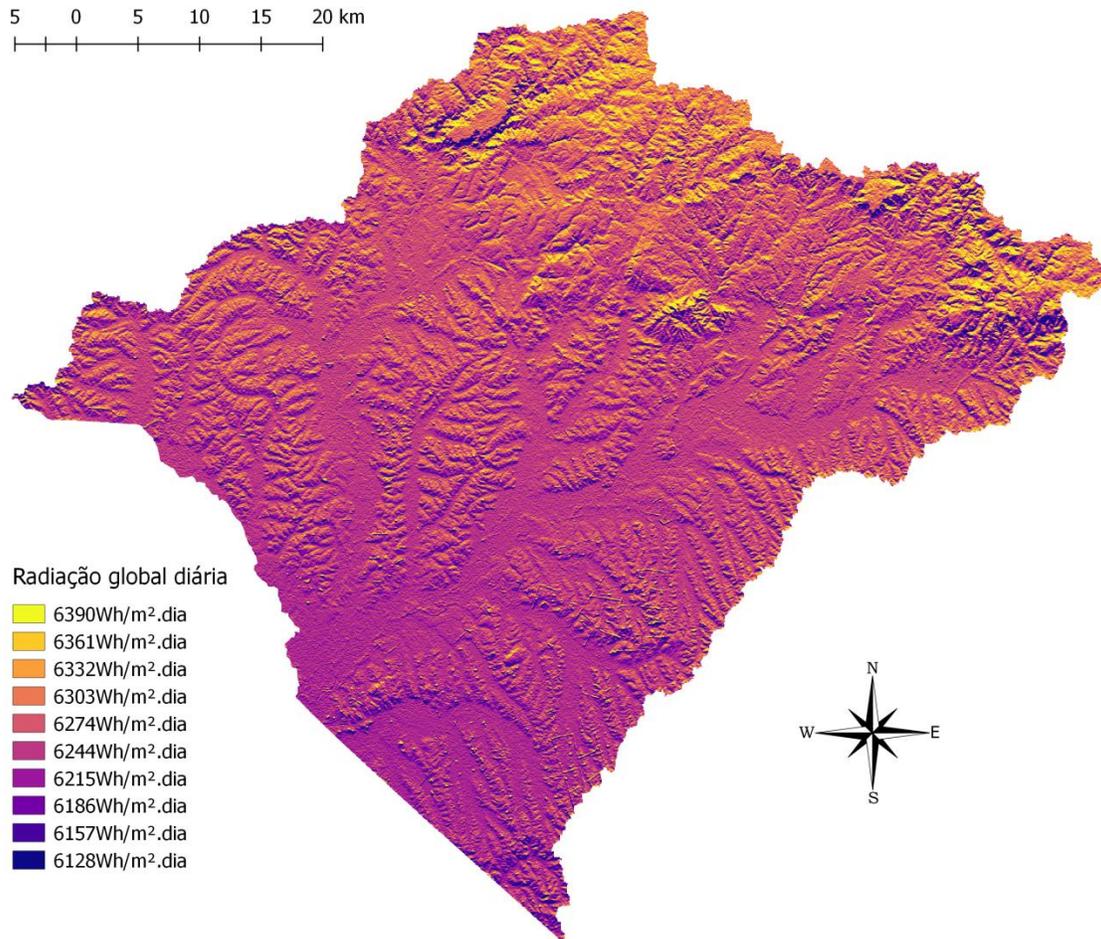
7) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de julho.



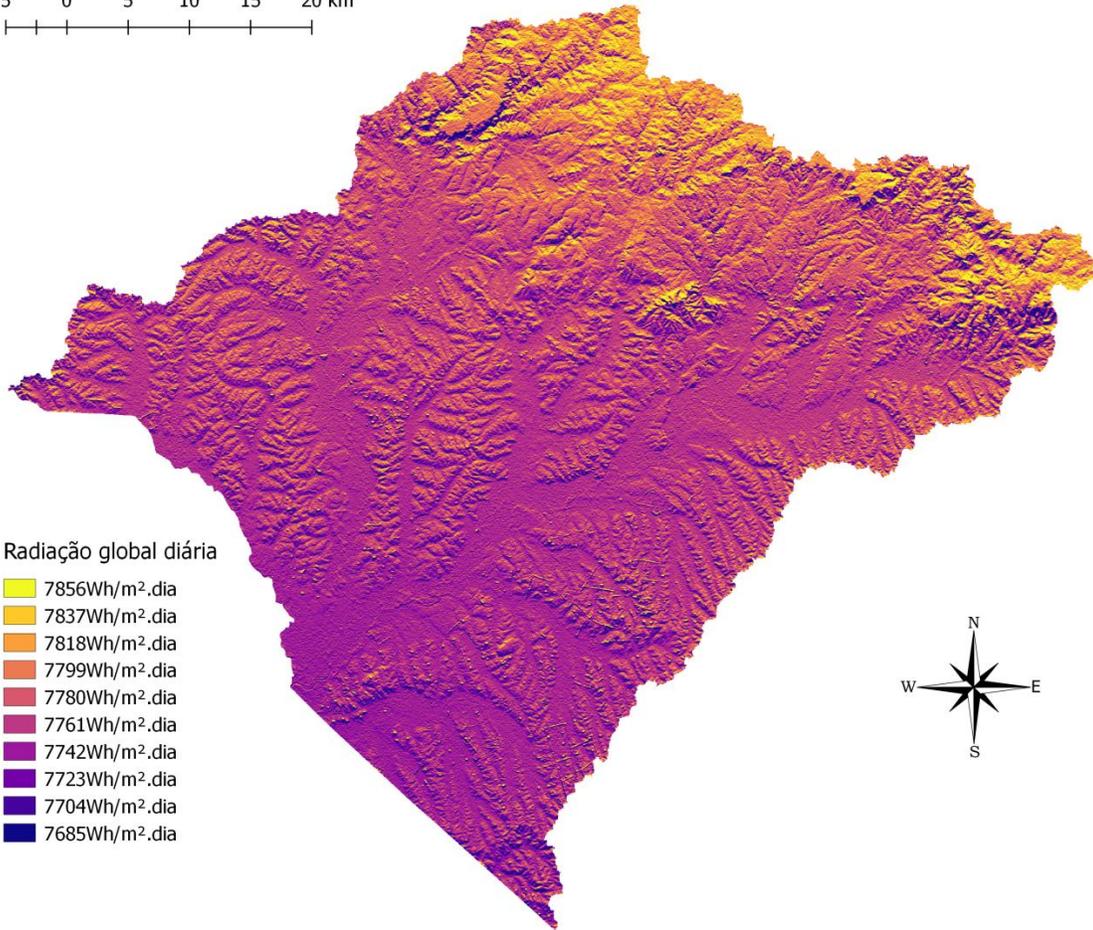
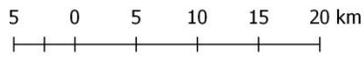
8) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de agosto.



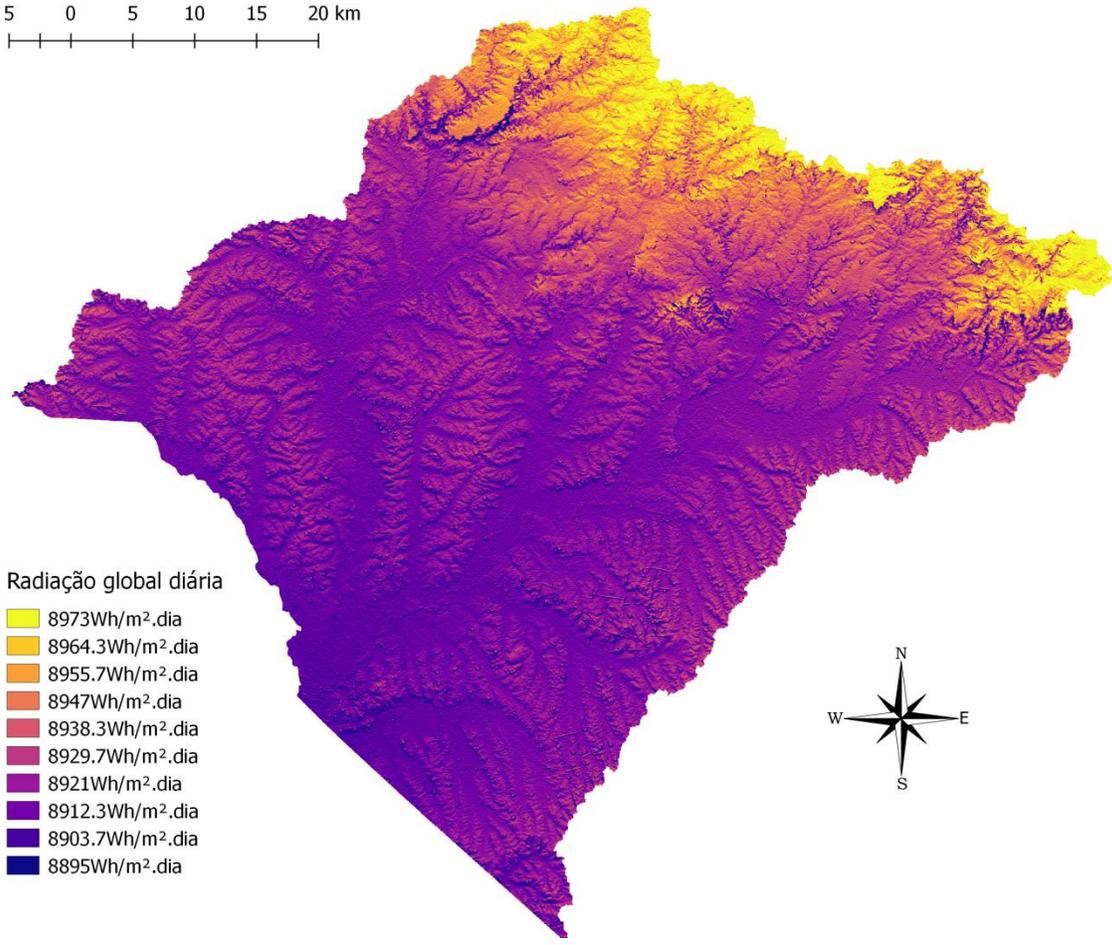
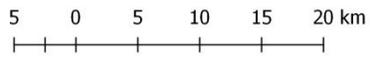
9) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de setembro.



10) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de outubro.



11) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de novembro.



Radiação global diária

- 8973Wh/m².dia
- 8964.3Wh/m².dia
- 8955.7Wh/m².dia
- 8947Wh/m².dia
- 8938.3Wh/m².dia
- 8929.7Wh/m².dia
- 8921Wh/m².dia
- 8912.3Wh/m².dia
- 8903.7Wh/m².dia
- 8895Wh/m².dia

12) Estimativa da irradiação global diária para o dia 15 de dezembro

5 0 5 10 15 20 km

