



ANÁLISE E APRIMORAMENTO DAS ESTIMATIVAS DE RADIAÇÃO SOLAR POR SATÉLITE GL A PARTIR DE IMAGENS GOES-16

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE/CNPq)

Luiz Felipe das Neves Lopes (UNISAL, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: luizfelipe2310@gmail.com

Dr. Juan Carlos Ceballos (CPTEC/DSA, Orientador)
E-mail: jcc.1943@gmail.com

Dr. Anthony Carlos Silva Porfirio (CPTEC/DSA, Coorientador)
E-mail: anthonycsp@gmail.com

COLABORADOR

José Marcio Britto (CPTEC/DSA)

Julho de 2019

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1. RADIAÇÃO SOLAR POR SATÉLITE: MODELO GL.....	3
2.2. SATÉLITES GOES: SENSORES IMAGER E ABI	4
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	7
3.1. Dados de superfície	7
3.2. Dados do modelo GL1.2.....	9
3.3. Manipulação de dados de superfície e satélite: scripts de análise.....	10
4. RESULTADOS	13
4.1. Ciclo diurno e resolução espacial.....	13
4.2. Ciclo diurno médio de céu claro	16
4.3. Concordância entre valores diários (medida vs GL1.2)	18
5. CONCLUSÕES	22
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág</u>
Figura 1 - Sensor ABI presente no GOES-16. Disponível em: https://www.goes-r.gov/spacesegment/abi.html . Acesso em julho 2019.	5
Figura 2 - Distribuição espacial das estações utilizadas da Rede Sonda e SolRad-Net.	8
Figura 3 - Modularização.	11
Figura 4 - Exemplo de código Python mostrando a função ‘GLBinarios’.	12
Figura 5 - Exemplo de código em Python mostrando funções desenvolvidas para o estudo.	12
Figura 6 - Exemplos de ciclos diurnos de radiação solar global medida e estimada pelo GL1.2 em diferentes resoluções espaciais (1x1, 3x3 e 5x5 pixels) e níveis de nebulosidade (esquerda: céu claro; direita: nublado). SP= medidas de superfície (Continua)	14
Figura 7 - Ciclos diurnos médios medidos e estimados via GL1.2 para dias de céu claro mês de julho 2018. (a) Alta Floresta, (b) Cuiabá-Miranda, (c) Ji-Paraná, (d) Brasília e (e) Cachoeira Paulista.	17
Figura 8 - Dispersão entre valores diários de irradiância solar global medida e estimada por satélite para o ano de 2018.	19
Figura 9 - Variabilidade diária da irradiância solar medida (linha azul), estimada GL1.2 (linha vermelha) e diferença (G-GL1.2, linha verde) ao decorrer do ano de 2018 para duas estações: Cachoeira Paulista e Alta Floresta.	21

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág</u>
Tabela 1 - Características gerais dos canais ABI GOES-16.	6
Tabela 2 - Levantamento de dados diários para cada estação de superfície. Período 2018.	7
Tabela 3 - Dias de céu claro selecionados.	9
Tabela 4 - Estrutura básica das planilhas mensais GL e estacao.	10
Tabela 5 - Exemplo de planilha GL ou ‘estacao’. Dados são em $W m^{-2}$.	10
Tabela 6 - Valores médios diários e diferença entre GL1.2 e medida (em $W m^{-2}$). Valores referentes a Figura 6.	16
Tabela 7 - Diferença média (em $W m^{-2}$) entre valor estimado e medido para diferentes horários (linhas azuis na Figura 7).	18
Tabela 8 - Médias trimestrais (em $W m^{-2}$) da irradiância solar e do desvio referentes à Figura 8.	20

RESUMO

O modelo GL1.2 tem sido utilizado no CPTEC para gerar campos de irradiância solar global sobre a América do Sul e áreas vizinhas a partir das imagens do canal visível (VIS) dos satélites geostacionários GOES. Recentemente (início de 2018), o modelo foi adaptado às imagens do satélite de última geração GOES-16. Este estudo tem como objetivo principal aprofundar o conhecimento sobre a qualidade das estimativas do modelo GL1.2 aplicado às informações do GOES-16 (canal 2 do sensor ABI). Duas redes com registros de dados de radiação solar à superfície foram adotadas como referência: rede SONDA (Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais do INPE) e SolRad-Net (Solar Radiation Network da NASA). Selecionaram-se 6 estações com dados disponíveis para o ano de 2018 (SONDA: Cachoeira Paulista e Brasília; SolRad-Net: Alta Floresta, Ji-Paraná, Cuiabá-Miranda e Rio Branco). Avaliou-se a correspondência entre as estimativas GL1.2 para diferentes escalas espaciais (1x1, centrado nas coordenadas da estação, e médias considerando grades de 3x3 e 5x5 pixels) e as medidas de superfície. Observou-se que os estimadores GL1.2 de 3x3 e 5x5 pixels são mais coerentes com os dados de verdade terrestre para dias de céu claro, mostrando um erro médio de $-5,4 \text{ W m}^{-2}$. Nos dias nublados, os três estimadores fornecem desempenhos muito similares. Ciclos diurnos estimados via GL1.2 e medidos foram confrontados e mostraram que o modelo consegue reproduzir bem dias predominantemente claros e nublados. Selecionaram-se dias de céu claro para o mês de julho, devido apresentar maior disponibilidade de dados, com o propósito de aprofundar a análise do ciclo diurno de radiação estimado pelo GL para condições simplificadas. Notou-se que o GL1.2 reproduz com boa qualidade o ciclo diurno de radiação global, com erros inferiores a 20 W m^{-2} na maioria dos horários. Em geral, os maiores erros são observados nos horários próximos ao pôr do Sol ($\approx 60 \text{ W m}^{-2}$, na maior parte das estações). Procurou-se também investigar o desempenho do modelo na estimativa da irradiância solar média diária. Os resultados revelam que o GL1.2 estima satisfatoriamente a irradiância solar diária à superfície, com desvios geralmente inferiores a $\pm 10 \text{ W m}^{-2}$; entretanto, apresenta tendência clara de superestimativa, variando a magnitude dos desvios de estação para estação. Melhor concordância em relação à verdade terrestre foi observada para o sítio de Cachoeira Paulista (situado na zona rural de São Paulo), enquanto que a pior foi para o sítio de Alta Floresta (situado na região Amazônica), sobretudo nos meses com maior concentração de aerossóis. Espera-se que as novas versões GL1.4 (melhor descrevendo a informação de w_2 e R_{min}) e GL2.0 (incluindo o efeito dos aerossóis) permitam aperfeiçoar as estimativas GL, sobretudo na região Amazônica.

Palavras-chave: Satélite GOES-16, modelo GL1.2, radiação solar

1. INTRODUÇÃO

O fluxo solar que atravessa a atmosfera e incide na superfície terrestre é a principal fonte de energia do sistema Terra-Atmosfera, e é o principal elemento do balanço de radiação solar. Segundo Budyko (1969, apud BOTTINO, 2000), pequenas variações na transparência atmosférica provocam mudanças no balanço de radiação solar, conseqüentemente, exercem efeitos no clima. Além disso, sabe-se que informações acerca do fluxo radiativo na superfície são importantes para diversos setores da sociedade, como: agricultura (cálculo da evapotranspiração e fotossíntese), turismo, geração de energia elétrica (fotovoltaica e por concentradores), para o monitoramento ambiental da Terra, do tempo e do clima.

O monitoramento da radiação solar é realizado por instrumentos instalados à superfície, denominados de piranômetros. Atualmente, o Brasil possui um número razoável de estações automáticas com registros de radiação solar. Contudo, devido ao país possuir dimensões continentais, ainda existem grandes áreas com ausência ou baixa densidade de dados. Imagens de satélites geoestacionários (como os da série *Geostationary Operational Environmental Satellite - GOES*) são eficazes para realizar o monitoramento da radiação solar. O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) emprega o modelo GL na versão 1.2 (do inglês, *GLobal Radiation Model, GL1.2*) processando imagens no canal visível (VIS) do satélite GOES-Leste para estimar a radiação solar global ao nível do solo com foco na América do Sul. A base de dados GL1.2 compreende um período superior a 20 anos (1998-presente). No início de 2018, o satélite geoestacionário de última geração GOES-16, operado pelas agências americanas *National Oceanic and Atmospheric Administration/National Aeronautics and Space Administration* (NOAA/NASA), tornou-se operacional e encontra-se posicionado sobre o equador em 75.2° de longitude. Com o propósito de manter o produto GL1.2 em modo operacional, fez-se necessária a adaptação do algoritmo às imagens VIS do GOES-16 (BRITTO et al., 2017). Estudos que visem aprofundar o conhecimento sobre a qualidade das estimativas GL1.2 com GOES-16 são necessários, no intuito de procurar manter o padrão de qualidade dos dados gerados/armazenados/fornecidos. Ainda, pesquisas recentes têm apontado a necessidade do aperfeiçoamento do modelo, sobretudo em relação às informações de água precipitável (w_2) e refletância da superfície (R_{min}) (PORFIRIO, 2017), conduzindo a

uma versão 1.4. Tais pesquisas devem ajudar a compreender as potencialidades/limitações do produto GL, o que trará impacto positivo nas pesquisas em andamento e futuras desenvolvidas no CPTEC e em outras instituições que fazem o uso desta fonte de informação.

1.1. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a qualidade das estimativas de radiação solar inferidas pelo modelo GL1.2 utilizando as imagens do novo satélite geoestacionário GOES-16, na perspectiva de identificar limitações e propor aperfeiçoamentos ao algoritmo. Com este intuito será necessário realizar comparações entre as estimativas por satélite e as medidas de superfície (verdade terrestre). Assim, destacam-se como objetivos específicos para o primeiro ano de atividades;

- Estudar o modelo GL: hipóteses, códigos e dados produzidos;
- Estudar conceitos básicos de radiação solar e de satélites meteorológicos;
- Organizar bases de dados de medidas de superfície e de estimativas GL1.2 GOES-16;
- Desenvolver rotinas computacionais para validação dos dados GL1.2;
- Avaliar a qualidade das estimativas por satélite GL1.2 GOES-16 de irradiância solar global média diária através de comparações com a verdade terrestre em diferentes locais do Brasil;
- Analisar a correspondência entre estimador GL1.2 sob diferentes escalas espaciais (1x1, 3x3 e 5x5 pixels) com a verdade terrestre;
- Comparar o ciclo diurno de irradiância solar global estimado pelo GL1.2 com o medido à superfície;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. RADIAÇÃO SOLAR POR SATÉLITE: MODELO GL

O modelo físico simplificado de estimativa de radiação solar por satélite GL versão 1.2 (GL1.2) roda operacionalmente no CPTEC possuindo uma base de dados superior a 20 anos. A primeira versão foi desenvolvida na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) para trabalhar com imagens do canal VIS do satélite Meteosat 4 (CEBALLOS E MOURA, 1997). Posteriormente, o GL foi instalado no CPTEC e adaptado às imagens do satélite GOES com algumas modificações, conduzindo a uma versão 1.2, que produz e fornece distribuições diárias e mensais de irradiância solar global sobre a América do Sul e áreas oceânicas adjacentes (ver site <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>).

Modelos que combinam conceitos de transferência radiativa e dados de satélites geralmente avaliam a irradiância solar global à superfície (G) a partir da irradiância emergente no topo (E_p), no espectro visível (centrado em $0,65 \mu\text{m}$), informação usualmente disponível em satélites geoestacionários. Existem diversos modelos de estimativa de radiação solar baseados na informação de satélite desenvolvidos e aplicados para diferentes partes do mundo. Esses modelos baseiam-se em conceitos estatísticos e físicos, variando de complexidade. Dentre os modelos físicos, apenas dois apresentam continuidade nas aplicações na América do Sul, desde a década de 1990: o IGMK (STUHLMANN et al., 1990), desenvolvido na Universidade de Colônia-Alemanha, teve aplicações iniciais no Brasil utilizando imagens Meteosat, foi adaptado para imagens GOES e culminou no modelo Brasil-SR, através de colaboração entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (PEREIRA et al., 1996); e o modelo GL (CEBALLOS et al., 2004). Ambos os modelos fazem uso de conceitos físicos de maneira distinta, propondo-se a estimar G a partir de E_p e embasando-se em conceitos de transferência radiativa, ou seja, contabilizando o efeito atenuante que nuvens, gases e aerossol exercem no fluxo de radiação. A modelagem de G por satélite possibilita gerar dados em boa frequência ($< 30 \text{ min}$) e alta resolução espacial ($< 4 \text{ km}$). Embora com vantagens óbvias, os dados de satélites ainda necessitam ser confrontados com observações de superfície. A presente pesquisa tem como ferramenta principal o modelo GL1.2.

A versão 1.2 do algoritmo GL divide o espectro solar em três intervalos: ultravioleta (UV), visível (VIS) e infravermelho solar (IVS), enquanto que a atmosfera é dividida em duas camadas: a troposfera (que vai do solo até a altura de aproximadamente 15 km), e a estratosfera (> 15 km de altura). Na estratosfera, a baixa densidade do ar não provoca a dispersão da radiação solar, enquanto os raios solares que incidem diretamente na estratosfera e refletidos pela troposfera têm absorvância parcial pelo ozônio estratosférico. Já a troposfera possui uma densidade atmosférica que provoca a dispersão da radiação solar, mas não a absorve, exceto pela presença de aerossóis. Sabe-se que as nuvens possuem reflexão e absorção de radiação elevadas no IVS, de modo que a transmitância difusa neste meio pode ser considerada mínima, assim, apenas a radiação direta que passa entre nuvens (sendo parcialmente absorvida pelo dióxido de carbono e pelo vapor d'água) incide ao nível do solo (CEBALLOS et al., 2004). Algumas simplificações são adotadas no GL1.2, tais como: distribuição constante da refletância de superfície ($R_{min} = 0,09$ em áreas continentais) e vapor de água w_2 (3,5 e 4,5 g cm⁻² em latitudes subtropicais e tropicais, respectivamente). A versão GL1.4 faz uso de distribuições espaciais de R_{min} e w_2 que variam no tempo, ou seja, informações mais realísticas. Esta versão está em fase avançada de desenvolvimento na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais DSA/CPTEC, entretanto a presente pesquisa foca na validação do GL1.2.

2.2. SATÉLITES GOES: SENSORES IMAGER E ABI

Satélites geostacionários são aqueles que possuem tempo de órbita de 24 horas, logo, possuem a mesma velocidade angular da Terra e, conseqüentemente, permanecem em uma posição fixa sobre um ponto do equador. Eles são capazes de registrar a radiação emergente no topo da atmosfera E_p com grande resolução espacial (da ordem de 4 km) e temporal (imagens a cada 30 min ou menos).

A longevidade temporal da série exibida pelas imagens dos satélites GOES é atrativa para a realização de estudos ambientais e climáticos baseados em dados de satélite (COSTA et al., 2018). A DSA armazena imagens GOES, do canal visível do sensor Imager, em frequência completa e alta resolução desde o ano de 1998, além de possuir imagens de menor resolução espacial e temporal desde 1996. Essas informações são a base para o processamento operacional do algoritmo GL1.2.

O Sensor Imager, presente no GOES-13, possuía 5 canais espectrais, sendo eles, um canal no espectro VIS (0,65 μm), e quatro canais no infravermelho IR (3,9; 6,55; 10,7 e 13,35 μm). A resolução espacial dos canais era de 1 km para o canal no VIS e 4 km para os canais no IR.

O sensor de última geração *Advanced Baseline Imager* (ABI) está a bordo do satélite GOES-16, operado pela NOAA/NASA (Figura 1). O ABI possui 16 canais espectrais, incluindo dois canais no visível (0,47 e 0,64 μm), quatro canais no infravermelho próximo (0,86, 1,37, 1,6 e 2,2 μm) e dez canais no infravermelho (3,9, 6,2, 6,9, 7,3, 8,4, 9,6, 10,3, 11,2, 12,3 e 13,3 μm) (Tabela 1). Além do maior número de canais, o sensor ABI fornece maior resolução espacial (entre 500m e 2 km, dependendo do canal) e temporal (quatro imagens no intervalo de 1 hora) em relação ao Imager dos satélites GOES anteriores (SCHMIT et al., 2017).



Figura 1 – Sensor ABI presente no GOES-16. Disponível em: <https://www.goes-r.gov/spacesegment/abi.html>. Acesso em julho 2019.

Tabela 1 - Características gerais dos canais ABI GOES-16.

Canal ABI	μm central	Resolução no ponto sub-satélite	Nome
1	0.47	1	Azul
2	0.64	0.5	Vermelho
3	0.86	1	Vegetação
4	1.37	2	Cirrus
5	1.61	1	Neve
6	2.24	2	Tamanho de partículas de nuvens
7	3.90	2	Janela em ondas curtas
8	6.19	2	Vapor d'água em níveis altos
9	6.93	2	Vapor d'água em níveis médios
10	7.34	2	Vapor d'água em níveis médio/baixos
11	8.44	2	Fase do topo de nuvens
12	9.61	2	Ozônio
13	10.33	2	Janela em ondas longas limpa
14	11.21	2	Janela em ondas longas
15	12.29	2	Janela em ondas longas suja
16	13.28	2	CO ₂

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Dados de superfície

As medidas de irradiância solar global ao nível do solo utilizadas neste trabalho são provenientes das estações automáticas da rede SONDA (Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais) e SolRad-Net (do inglês *Solar Radiation Network*). As duas redes disponibilizam de forma pública os dados, de modo que qualquer pessoa pode ter acesso em formato de planilhas de texto. As estações pertencentes à rede SONDA disponibilizam os dados no site <http://sonda.ccst.inpe.br/>, com uma resolução de minuto a minuto. O acesso à base de dados SolRad-Net é obtido através do site <https://solrad-net.gsfc.nasa.gov/>. Os registros são fornecidos na escala temporal entre 1-2 minutos. Foi realizado um levantamento histórico do conjunto de dados ofertado pelas duas redes com o propósito de gerar informação útil para o presente e estudo futuros. A análise mostrou grandes descontinuidades nos registros, variando conforme a estação (Tabela 2). De fato, poucas estações possuem uma série de dados contínua e livre de falhas operacionais. Para o presente estudo, foram utilizadas as estações com medidas disponíveis para o ano de 2018, período no qual iniciou-se o processamento do GL1.2 com imagens VIS GOES-16. As estações adotadas foram: Cachoeira Paulista (CPA) e Brasília (BRB), para rede SONDA e Alta Floresta (AFL), Cuiabá-Miranda (CBM), Ji-Paraná (JIP) e Rio Branco (RB), para a rede SolRad-Net. A distribuição espacial das estações adotadas no estudo é apresentada na Figura 2.

Tabela 2 - Levantamento de dados diários para cada estação de superfície. Período 2018.

Estação\Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
BRB	2	23	1	8	23	X	12	Y	Y	Y	Y	Y
CPA	31	28	31	30	31	30	31	Y	Y	Y	Y	Y
AFL	31	28	31	30	31	30	31	30	29	31	16	12
JIP	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
CBM	31	28	31	30	31	30	17	18	30	31	30	31
RB	15	20	26	20	23	18	11	13	8	Y	X	X

X= dados indisponíveis e Y= dados não utilizados;

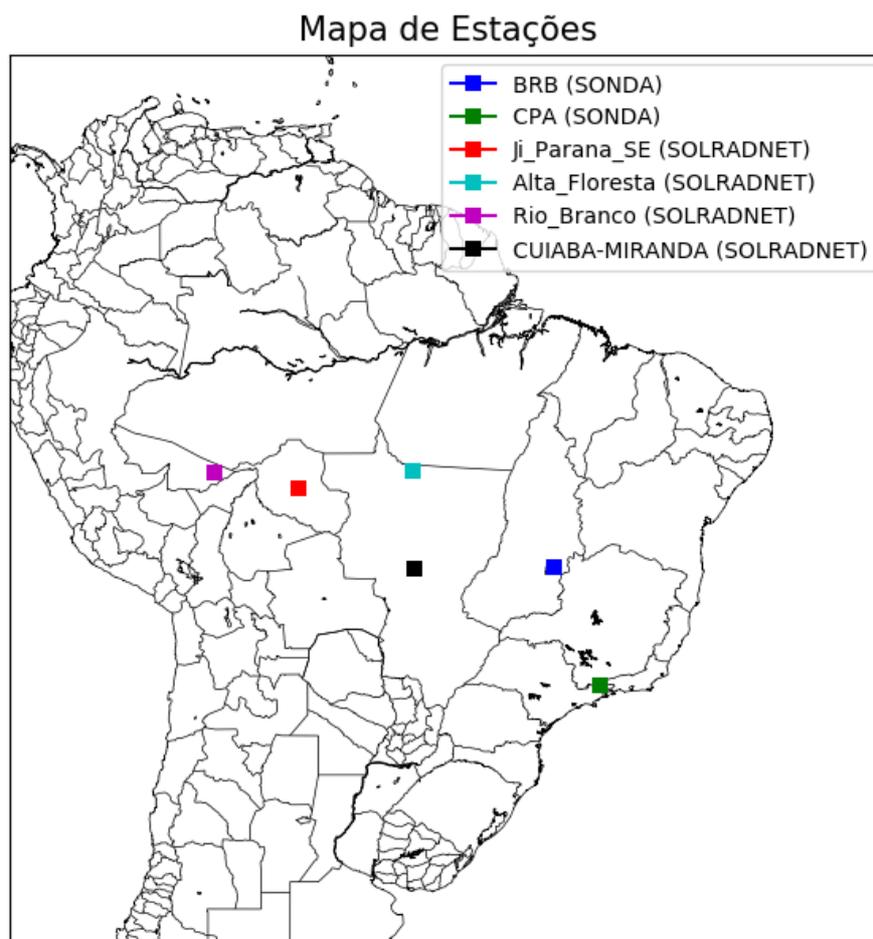


Figura 2 – Distribuição espacial das estações utilizadas da Rede Sonda e SolRad-Net.

A Tabela 2 mostra o número de dias disponíveis para cada mês do ano. Os valores instantâneos de radiação solar foram lidos e processados por meio de programas na linguagem Python (maiores detalhes seção 3.3). A partir dos valores instantâneos, geraram-se médias horárias e integrais diárias considerando o período entre o nascer e pôr do Sol. Foram construídos scripts para a visualização de ciclos diurnos de radiação solar. Esses gráficos permitiram identificar diferentes características da radiação solar. Dias predominantemente de céu claro foram selecionados com o propósito de melhor apreciar o comportamento do GL1.2 em condições atmosféricas simplificadas, isto é, ausência de nuvens. Os dias de céu claro selecionados mostraram poucas variações abruptas (ou ausência) da irradiância solar ao longo do dia. A Tabela 3 apresenta as datas consideradas de céu claro.

Tabela 3 - Dias de céu claro selecionados.

Rede	Estação	Data	Núm. de dias
Sonda	CPA	30/03, 01/05, 05/05, 10/05, 15/05, 21/05, 22/05, 16/07, 18/07, 19/07, 20/07	11
	BRB	21/05, 21/07, 22/07, 23/07, 27/07, 28/07, 29/07, 30/07	8
SolRad-Net	AFL	05/06, 13/06, 16/06, 22/06, 23/06, 01/07, 16/07, 19/07, 21/07, 23/07, 21/08, 26/08	12
	CBM	20/05, 23/06, 01/07, 03/07, 16/07	5
	JIP	03/07, 18/07, 22/07, 23/07, 27/07	5
	RB	21/05	1

3.2. Dados do modelo GL1.2

Até dezembro de 2017 o modelo GL1.2 utilizava imagens do canal visível do GOES-13 para o cômputo dos fluxos radiativos à superfície. A partir do ano de 2018, o modelo passou a gerar campos de radiação solar sobre a América do Sul através das imagens VIS GOES-16. O GL produz como saída arquivos no formato binário com dimensão de 1800x1800 pixels e resolução espacial de 0,04° (aproximadamente 4 km). A informação de saída refere-se a irradiância solar instantânea média (em $W m^{-2}$) em períodos de 15 ou 30 minutos, para imagens individuais, e a irradiância média diária (em $W m^{-2}$) ao se fazer a integração de todas as informações do dia (na escala de pixel).

Para fins de estudos desenvolvidos pelo Grupo de Radiação Solar e Terrestre, elaborou-se uma lista de locais (denominada de 'lista unica') onde há registros de radiação solar ou que são de eventual interesse. A lista única é composta por 1446 locais (pontos de amostragem GL1.2) que incluem as redes automáticas do INMET, SONDA, SolRad-Net, dentre outras redes nacionais e internacionais. Com base na informação disponível dentro de um mês (arquivos binários), são geradas planilhas com a informação "GL" para os locais pré-determinados da lista única. Planilhas baseadas na lista única contendo dados de superfície são também construídas e fornecidas pelo Grupo, denominadas de "estacao". Ambas as planilhas possuem a mesma estrutura

conforme as Tabelas 4 e 5. Foram desenvolvidos scripts para leitura dos arquivos binários gerados pelo modelo GL1.2 (escala temporal diária), e uso dos dados para geração de planilhas atualizadas, incluindo as estações adotadas no trabalho. Além de contribuir como base para as comparações iniciais deste trabalho, as planilhas ‘estacao’ e ‘GL’ também fornecem informação de fácil acesso para estudos futuros.

Tabela 4 - Estrutura básica das planilhas mensais GL e estacao.

Coluna(s)	Informação	Descrição
1	ID	Número identificador da estação: 29000 a 32799
2	Latitude	-999 se indefinida
3	Longitude	-999 se indefinida
4	Altitude	-999 se indefinida
5	Dono	Rede específica de instrumentos, ou apenas país, =-999 se indefinido
6 a 36	Dados	Irradiância média dos dias 1 a 31 do mês. Se não houver dados =-999

Tabela 5 - Exemplo de planilha GL ou ‘estacao’. Dados são em $W m^{-2}$.

%ID	Lat	Lon	Alt	Dono	1	2	3	...	28	29	30	31
29000	-35.58	-59.0	-999	1	272.8	287.2	382.6	...	-999	367.3	362.6	329.6
29001	-38.733	-62.267	21	1	282.2	271.1	264.5	...	-999	306.0	261.6	298.3
29002	-34.606	-58.419	14	1	330.8	323.0	369.3	...	-999	344.5	344.6	314.5
29003	-38.948	-68.059	255	1	350.4	328.5	125.1	...	-999	274.7	329.6	324.2
29004	-26.942	-65.335	437	1	104.6	387.4	384.5	...	-999	297.8	312.7	149.7
29005	-24.784	-65.415	1171	1	102.5	367.7	360.9	...	-999	131.9	145.7	109.7
29006	-27.446	-58.997	48	1	78.5	315.3	378.5	...	-999	373.9	374.8	326.8
29007	-31.83	-60.52	-999	1	123.1	361.9	363.2	...	-999	370.8	368.6	301.3

3.3. Manipulação de dados de superfície e satélite: scripts de análise

Nesta etapa foram desenvolvidos scripts para manipulação dos dados de superfície e satélite que permitiram desenvolver o estudo de validação. A linguagem de programação adotada foi o Python, uma linguagem que vem sendo bastante utilizada na área das ciências ambientais, com boa velocidade de processamento, vasta gama de bibliotecas para as mais diversas finalidades e por não possuir custos com licenças de uso. As principais funções dos scripts foram centralizadas em um arquivo principal denominado ‘funcoes.py’, de modo que permitisse a reutilização em outros scripts

(Figura 3). O módulo inclui comandos que realizam a integração diária, cálculo de índices estatísticos e tratamento dos dados. O script ‘Principal.py’ é responsável por processar e gerar as figuras do ciclo diurno e ciclo anual, para ambas redes, importando o módulo ‘funcoes.py’.

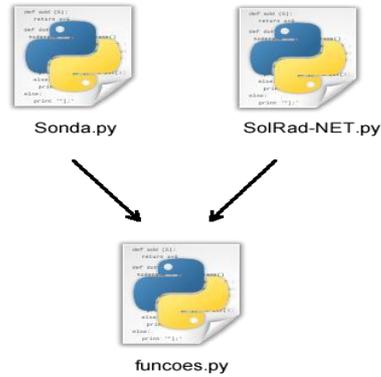


Figura 3 – Modularização.

A Figura 4 ilustra parte de um código usando a linguagem de Programação Python. A função ‘GLBinarios’ lê os arquivos binários GL disponíveis ao longo de um dia e recupera o valor da irradiância solar média para o pixel mais próximo de uma estação dada a partir de sua posição geográfica, informada na invocação da função. A Figura 5 apresenta funções para leitura do arquivo binário, obter o valor GL para um pixel e médias para diferentes áreas (1x1, 3x3 e 5x5 pixels, centrado no pixel que corresponde com a estação).

```

def GLbinarios(dia, mes, ano, estacoes):
    diretorio = './DADOS/GLG0ESbin_horarios/' + str(ano) + format(mes, '02d') + '/'
    minutos = [0, 15, 30, 45]
    final1x = len(estacoes) * [len(minutos) * 24 * [None]]
    final3x = len(estacoes) * [len(minutos) * 24 * [None]]
    final5x = len(estacoes) * [len(minutos) * 24 * [None]]

    for h in range(0, 24):
        for m in range(len(minutos)):
            try:
                file = 'S11636057_' + str(ano) + format(mes, '02d')
                    + format(dia, '02d') + format(h, '02d')
                    + format(minutos[m], '02d') + '.bin'

                matriz = binario(diretorio + file, ano)

                for i in range(len(estacoes)):
                    lat = estacoes[i][0]
                    long = estacoes[i][1]

                    p = (h) * len(minutos) + m

                    final1x[i][p] = getir(matriz, lat, long, 0, 0)
                    final3x[i][p] = regiao(matriz, lat, long, 1)
                    final5x[i][p] = regiao(matriz, lat, long, 2)

            except FileNotFoundError: pass

    return [final1x, final3x, final5x]

```

Figura 4 - Exemplo de código em Python mostrando a função ‘GLBinarios’.

```

def binario(diretorio, ano):
    x = np.fromfile(diretorio, np.int16)
    if(ano < 2018): x = x.byteswap()
    x = x.reshape(1800, 1800)
    x = x/10
    return x

def getir(matriz, linha, coluna, lin, col):
    try:
        valor = matriz[linha+lin, coluna+col]
        if(valor <= 0) : return None
        else: return(float(valor))
    except: return(None)

def regiao(matriz, linha, coluna, n):
    lista = []
    for y in range(-n, n+1):
        for x in range(-n, n+1):
            # linha, coluna
            ir = getir(matriz, linha, coluna, x, y)
            lista.append(ir)

    c = contarelemento(lista)
    if(c != 0):
        return somararray(lista) / c
    else: return None

```

Figura 5 - Exemplo de código em Python mostrando funções desenvolvidas para o estudo.

4. RESULTADOS

4.1. Ciclo diurno e resolução espacial

A acurácia do modelo GL1.2 para avaliar ciclos diurnos foi observada desde dois pontos de vista. Primeiramente, avaliou-se a correspondência entre ciclos diurnos de radiação solar global medida e estimada por satélite (modelo GL1.2), em algumas datas selecionadas, para seis estações em diferentes condições de nebulosidade (céu claro e nublado). O propósito desta análise é averiguar se os dados GL1.2 conseguem representar bem o ciclo diurno de radiação para essas duas condições atmosféricas. Os resultados são ilustrados na Figura 6. Observa-se que nos dias de céu claro os níveis de radiação solar têm máximos em torno de 800 W m^{-2} , por volta das 16 UTC, enquanto que para os dias de céu nublado os níveis máximos foram fortemente inferiores (em torno de 200 W m^{-2}) e ocorrem em horários diversos. De modo geral, nota-se que ao longo do período diurno, o modelo consegue reproduzir às variações observadas para as curvas de céu claro e nublado. Contudo, percebe-se que por vezes as estimativas GL1.2 são levemente superiores/inferiores à verdade terrestre. Este comportamento foi observado de forma bastante generalizada durante o ano de 2018.

Por outro lado, a fim de visualizar o desempenho do modelo em diferentes escalas espaciais, foram realizadas comparações com a verdade terrestre considerando médias para alvos de 1x1, 3x3 e 5x5 pixels (centradas no local da medida). A Figura 6 sugere que as médias GL1.2 para grades 3x3 e 5x5 pixels são similares e com acurácia levemente superior que o valor isolado 1x1 pixel, na condição de céu claro. A diferença média entre GL1.2 e medida para 3x3 e 5x5 pixels foi de $-5,4 \text{ W m}^{-2}$, enquanto que para 1x1 foi de $-9,1 \text{ W m}^{-2}$. Para dias de céu nublado, os três estimadores GL1.2 (1x1, 3x3 e 5x5 pixels) parecem equivalentes mas apresentariam desvios negativos com relação às medidas, da ordem de $-10,1 \text{ W m}^{-2}$. A Tabela 6 apresenta de forma resumida as diferenças entre a integral diária dos 3 critérios e a medida. Em resumo, os resultados indicam que a concordância entre os estimadores GL1.2 para 3x3 e 5x5 pixels e a verdade terrestre é maior e com um desvio padrão levemente inferior ($\sim 15 \text{ W m}^{-2}$).

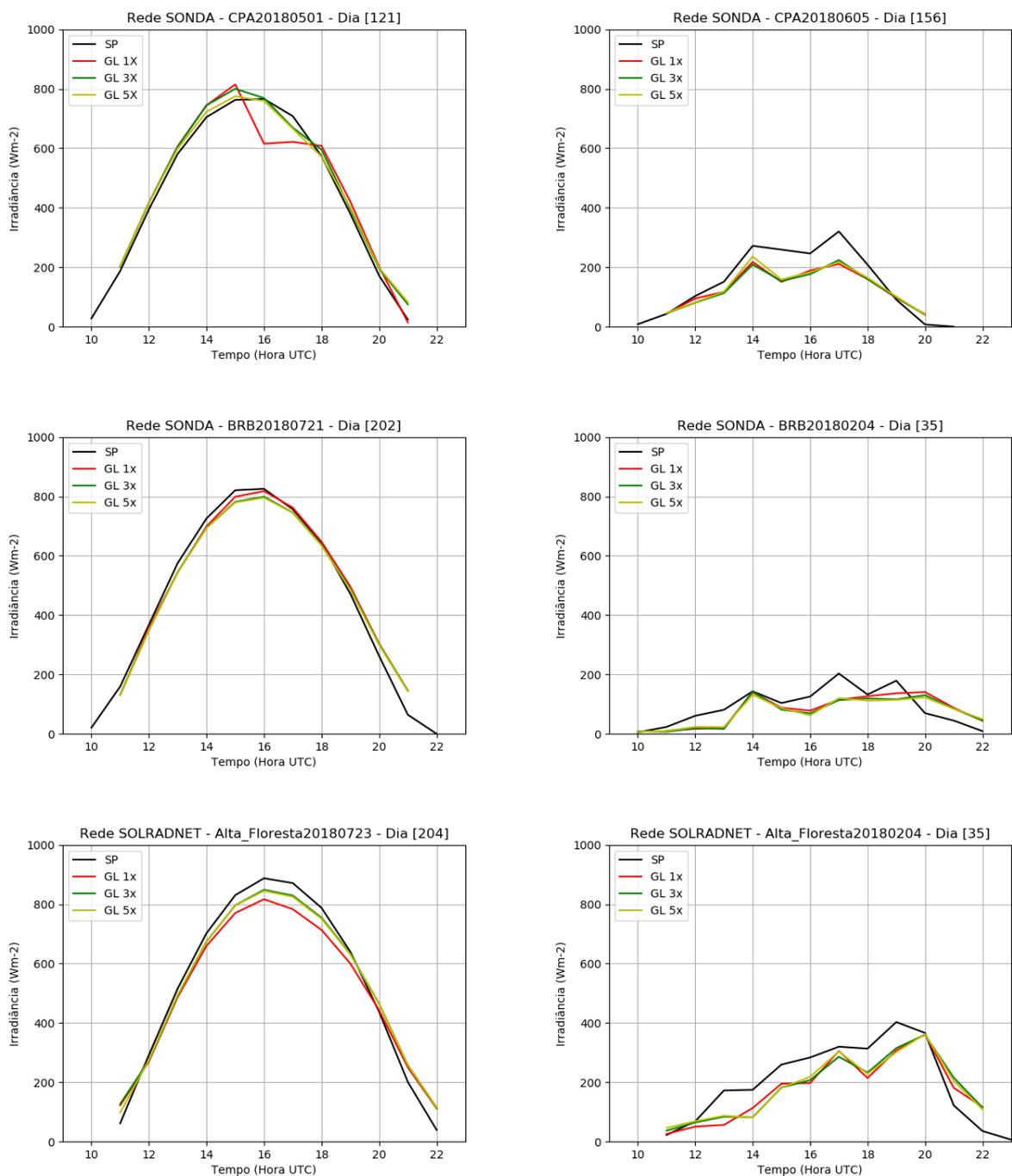


Figura 6 - Exemplos de ciclos diurnos de radiação solar global medida e estimada pelo GL1.2 em diferentes resoluções espaciais (1x1, 3x3 e 5x5 pixels) e níveis de nebulosidade (esquerda: céu claro; direita: nublado). SP= medidas de superfície (Continua)

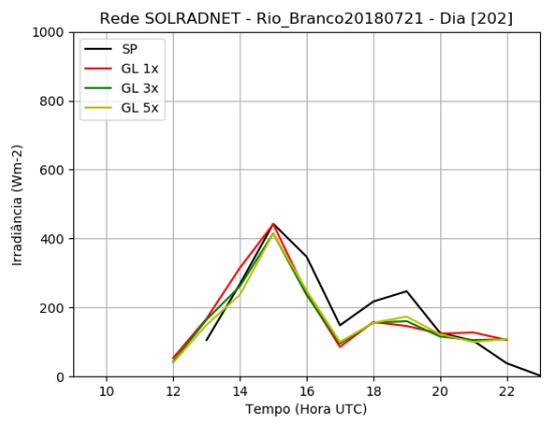
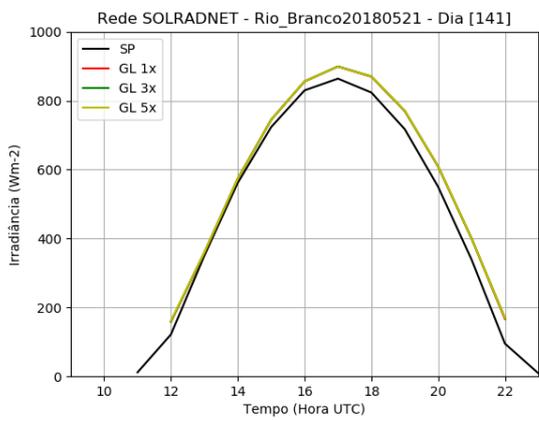
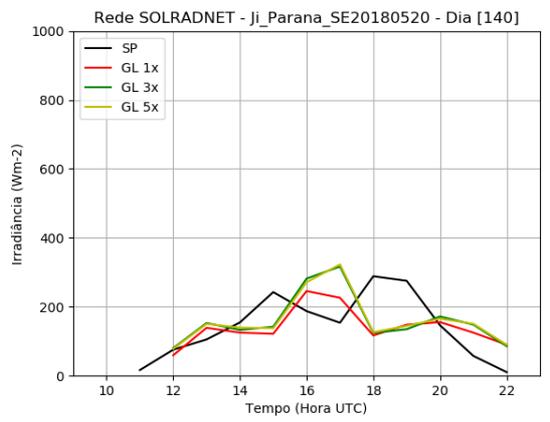
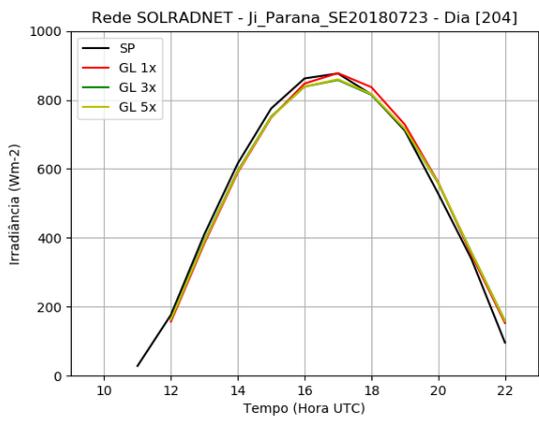
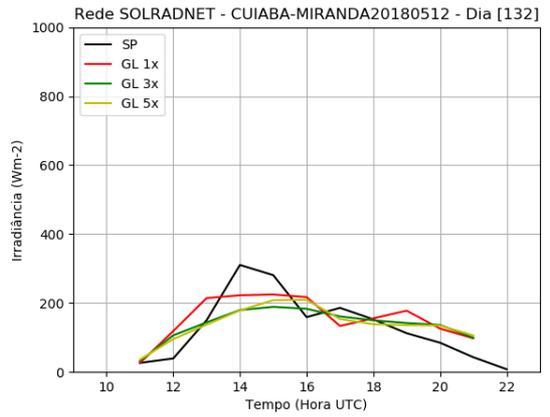
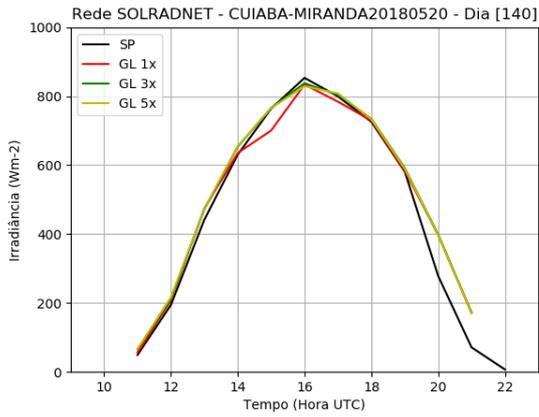


Figura 6 - Conclusão.

Tabela 6 - Valores médios diários e diferença entre GL1.2 e medida (em $W m^{-2}$).
Valores referentes a Figura 6.

Nome	Média Diária				Diferença		
	G	GL 1p	GL 3p	GL 5p	GL 1p	GL 3p	GL 5p
CPA (Céu Claro)	219	215	222,2	218,9	-4,0	3,2	-0,1
CPA (Céu Nublado)	71,2	53,5	52,5	54,5	-17,7	-18,7	-16,7
BRB (Céu Claro)	236,8	186,3	188,7	190,2	-50,5	-48,1	-46,6
BRB (Céu Nublado)	49,3	40,8	38,7	38,3	-8,5	-10,6	-11
Alta_Floresta (Céu Claro)	259,1	246,3	256,1	255,1	-12,8	-3,0	-4,0
Alta_Floresta (Céu Nublado)	104,8	85,7	87,8	88,03	-19,1	-17,0	-16,7
CUIABA-MIRANDA (Céu Claro)	223,7	227,5	232,8	232,8	3,8	9,1	9,1
CUIABA-MIRANDA (Céu Nublado)	64,0	68,9	60,7	61,0	4,9	-3,3	-3,0
Ji_Parana_SE (Céu Claro)	257,2	253,3	251,7	251,7	-3,9	-5,5	-5,5
Ji_Parana_SE (Céu Nublado)	70,9	61,6	70,3	70,5	-9,3	-0,6	-0,4
Rio_Branco (Céu Claro)	247,2	260,1	260,3	260,4	12,9	13,1	13,2
Rio_Branco (Céu Nublado)	87,0	78,6	74,5	74,0	-8,4	-12,5	-13,0
Desvio médio					-9,4	-7,8	-7,9

4.2. Ciclo diurno médio de céu claro

Nesta seção buscou-se identificar/quantificar de forma simplificada a qualidade do modelo ao longo do período diurno para dias de céu claro. De acordo com a maior disponibilidade de dias de céu claro (ver Tabela 3), adotou-se o mês de julho para esta análise. A Figura 7 mostra curvas que representam o ciclo diurno médio de irradiância solar global medida (curva preta), estimada GL1.2 (curva vermelha) e a diferença (curva azul). Observa-se que as estimativas GL1.2 para Cachoeira Paulista, Cuiabá-Miranda e Ji-Paraná foram mais acuradas. As curvas para esses locais retratam que o modelo representa bem o ciclo diurno na maior parte dos horários, sendo que os erros são superiores próximos ao fim do dia. As diferenças médias nos horários do entorno do meio dia são inferiores a $\pm 20 W m^{-2}$. Por outro lado, notou-se um comportamento diferente para os sítios de Alta Floresta e Brasília, com diferenças consideráveis tanto no meio do dia quanto no fim do dia. Embora tenha sido utilizado nesta análise, o sítio de Brasília parece ter pouca consistência, devido a baixa disponibilidade de dados com boa qualidade (ver Tabela 2 e Figura 8). A Figura para a estação de Rio Branco não foi incluída por não apresentar dias de céu claro disponíveis (Tabela 3). Em relação aos valores médios diários, os sítios AF, CPA e JIP mostraram diferenças inferiores a $\pm 15 W m^{-2}$ ($< 7\%$, considerando uma irradiância média de $200 W m^{-2}$).

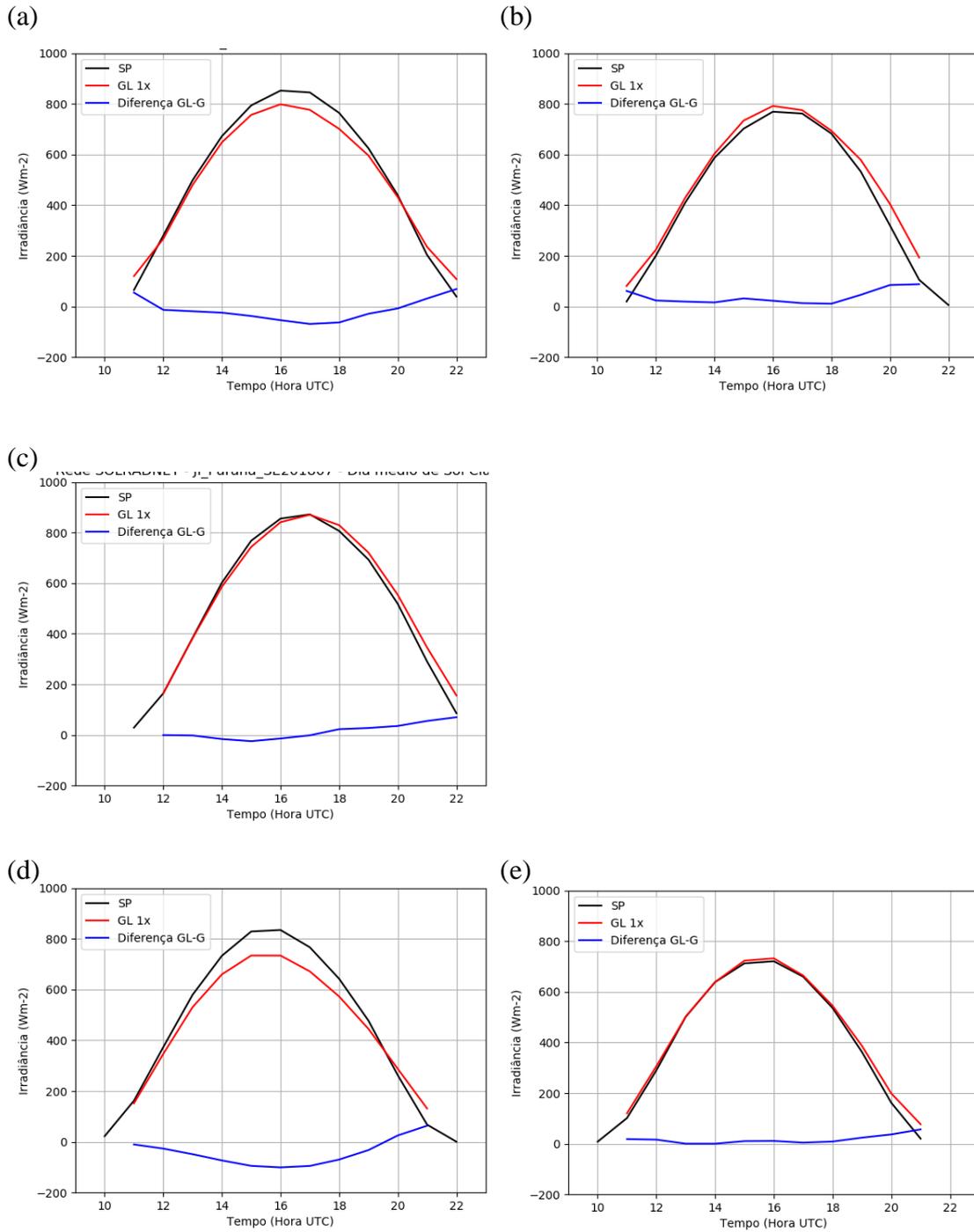


Figura 7 - Ciclos diurnos médios medidos e estimados via GL1.2 para dias de céu claro mês de julho 2018. (a) Alta Floresta, (b) Cuiabá-Miranda, (c) Ji-Paraná, (d) Brasília e (e) Cachoeira Paulista.

Tabela 7 - Diferença média (em $W m^{-2}$) entre valor estimado e medido para diferentes horários (linhas azuis na Figura 7).

Hora\Estação	AF	CBM	JIP	BRB	CPA
11	54.8	61.3	-	-10.3	18.6
12	-13.1	23.8	-0.6	-26.6	16.4
13	-18.7	19.4	-2.0	-48.7	0.4
14	-24.4	16.2	-16.2	-73.3	0.4
15	-37.4	32.0	-24.5	-94.7	10.5
16	-54.0	22.8	-14.1	-100.7	11.3
17	-68.8	13.3	-1.4	-95.0	4.5
18	-63.0	11.1	22.9	-69.8	8.8
19	-28.6	46.0	27.5	-32.5	24.2
20	-7.6	84.9	35.5	25.2	36.9
21	31.6	88.0	55.4	63.5	56.7
22	68.8	-	70.1	-	-
Média	-13.4	38.1	13.9	-42.1	17.2

4.3. Concordância entre valores diários (medida vs GL1.2)

A Figura 8 permite avaliar a qualidade das estimativas médias diárias de irradiância solar global GL1.2 para as quatro estações do ano. Adotaram-se os meses dezembro—fevereiro como verão, março—maio como outono, junho—agosto como inverno e setembro—novembro como primavera. No geral, observa-se que o modelo tende a superestimar a radiação diária medida, mas variando conforme a época do ano e localidade. Os resultados evidenciam uma boa linearidade bem como uma baixa dispersão. Os melhores resultados foram encontrados para Cachoeira Paulista, sem mudanças consideráveis no padrão de qualidade ao longo do ano, entretanto para o período de setembro a novembro, não houve dados disponíveis. As estimativas GL1.2 para o sítio de Alta Floresta foram mais dispersas e com uma maior concentração de pontos acima dos valores observados, ou seja, com padrão de superestimativa, apresentando maiores erros em relação às outras estações analisadas. Verifica-se também que as maiores diferenças em relação às observações ocorreram para os meses com maior presença de aerossóis de queimada na atmosfera (setembro-outubro, pontos amarelos). Os desvios médios para essa época do ano variam entre $9,2 W m^{-2}$ (Rio Branco) e $21,3 W m^{-2}$ (Alta Floresta). A estação de Brasília mostrou poucos dados

disponíveis e valores bastante dispersos, o que pode estar associado a problemas nos registros dos dados de superfície.

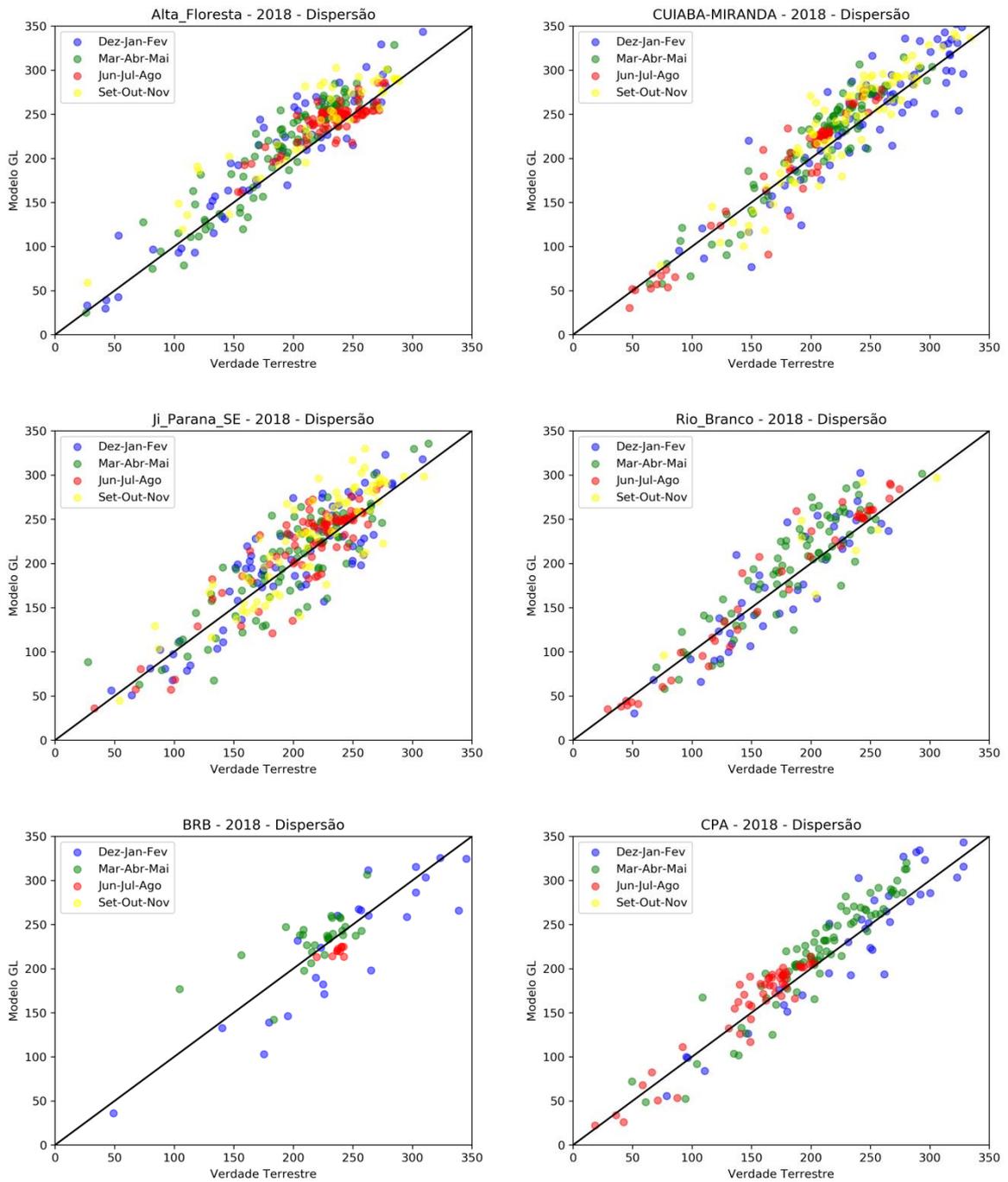


Figura 8 - Dispersão entre valores diários de irradiância solar global medida e estimada por satélite para o ano de 2018.

Tabela 8 – Médias trimestrais (em $W m^{-2}$) da irradiância solar e do desvio referentes à Figura 8.

Estação	Meses	G	GL1.2	Desvio
CPA	DJF	240.3	241.6	1.3
	MAM	205.5	218.8	13.3
	JJA	152.1	161.5	9.4
	SON	-	-	-
BRB	DJF	182.1	198.8	-17.3
	MAM	191.6	210.6	13.5
	JJA	233.5	243.2	-17.1
	SON	-	-	-
AF	DJF	182.1	198.8	16.7
	MAM	191.6	210.6	19
	JJA	233.5	243.2	9.7
	SON	214.8	236.1	21.3
CBM	DJF	247.7	247.7	0
	MAM	206.2	218.4	12.2
	JJA	181.6	190	8.4
	SON	228	238.9	10.9
JIP	DJF	191.8	196.7	4.9
	MAM	198.1	201.8	3.7
	JJA	211.3	218.9	7.6
	SON	213.6	226.3	12.7
RB	DJF	172.5	172.4	-0.1
	MAM	183.7	196.8	13.1
	JJA	169.1	176.3	7.2
	SON	213.4	222.6	9.2

No intuito de melhor avaliar e representar o desempenho do modelo ao longo do ano, selecionamos duas estações com distintos comportamentos, que são: Cachoeira

Paulista, interior do Estado de São Paulo situada em zona rural e Alta Floresta região Amazônica. A Figura 9 permite acompanhar a variabilidade diária de radiação solar medida (azul) e a estimada (vermelho) ao decorrer do ano de 2018, assim como sua diferença (verde). Para a estação de Cachoeira Paulista, em geral, observa-se que o modelo GL1.2 acompanha bem a verdade terrestre ao longo de todo o ano, exibindo desvios médios diários geralmente inferiores a 30 W m^{-2} e próximos do nulo (reta preta). Para a estação Alta Floresta, os resultados evidenciam que o modelo GL1.2 superestima de forma razoavelmente sistemática os valores de superfície, com extremos atingindo níveis de 100 W m^{-2} . Percebe-se também que as maiores diferenças ocorrem durante os meses de primavera (dias julianos entre 244 a 334).

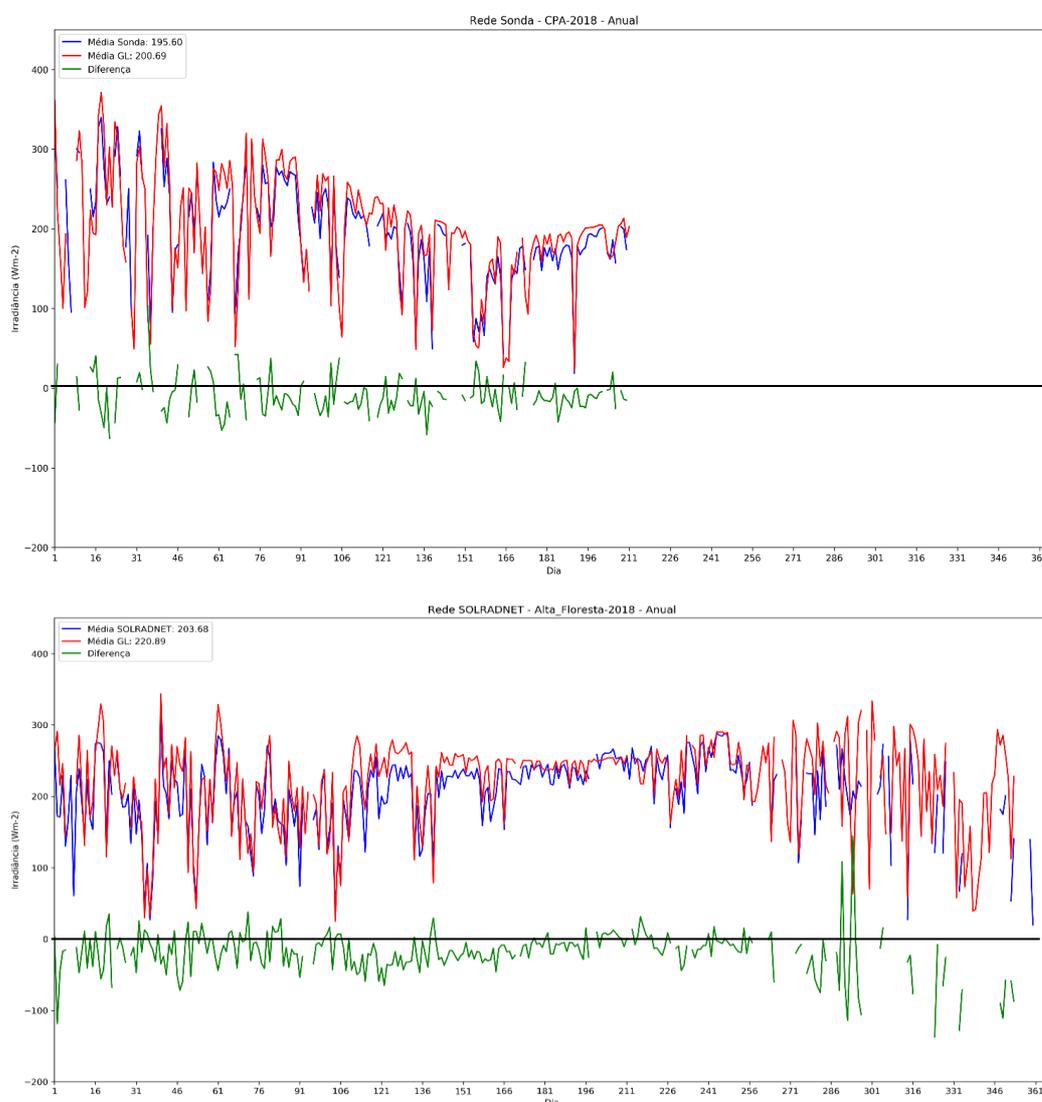


Figura 9 - Variabilidade diária da irradiância solar medida (linha azul), estimada GL1.2 (linha vermelha) e diferença (G-GL1.2, linha verde) ao decorrer do ano de 2018 para duas estações: Cachoeira Paulista e Alta Floresta.

5. CONCLUSÕES

O produto operacional de radiação solar GL1.2 aplicado às imagens GOES-16 foi validado neste estudo para o ano de 2018. As validações foram realizadas considerando 6 estações provenientes das redes SONDA e SolRad-Net. Em geral, os resultados evidenciam que o modelo GL1.2 produz estimativas de irradiância solar global com qualidade satisfatória para diferentes condições atmosféricas e ambientais. Comprovou-se que as estimativas GL1.2 conseguem reproduzir com boa acurácia ciclos diurnos em condições de céu claro e nublado, sendo que desvios positivos e negativos podem ocorrer ao longo do dia.

Uma análise da correspondência entre estimadores GL1.2 para grades de 1x1, 3x3 e 5x5 pixels e a verdade terrestre foi realizada. Os estimadores GL1.2 de 3x3 e 5x5 pixels são similares e melhor representativos da verdade terrestre para céu claro, com desvio médio de $-5,4 \text{ W m}^{-2}$. Na condição de céu nublado, não houve diferença significativa entre os estimadores GL1.2 de 1x1, 3x3 e 5x5 pixels. Tais resultados são interessantes e podem sugerir adaptações nos estimadores GL1.2 dependendo da condição de cobertura de nuvens.

O ciclo diurno da irradiância solar global estimada pelo GL1.2 foi avaliado para condições simplificadas (dias de céu claro para o mês de julho). Na maior parte das estações o modelo demonstra reproduzir com boa qualidade o ciclo diurno, com erros inferiores a 20 W m^{-2} e maiores diferenças no final do dia. Os sítios Alta Floresta e Brasília mostram maiores desvios nos horários próximos ao meio e fim do dia, com desvios da ordem de -60 W m^{-2} . Tais diferenças devem estar associadas com a refletância de superfície R_{min} , uma vez que espera-se um ciclo diurno, enquanto que o modelo adota um valor constante. Estudos mais abrangentes devem indicar com maior clareza as razões para essas discrepâncias.

A validação dos valores diários GL1.2 indica que o modelo apresenta boa relação linear com a verdade terrestre, com erros típicos inferiores a 10 W m^{-2} . Comportamento observado para a maioria das estações. Contudo, os dados GL1.2 tendem a superestimar às observações, mas variando de magnitude de estação para estação. Os resultados evidenciam que o modelo consegue reproduzir melhor a variabilidade diária da radiação solar à superfície para a condição atmosférica de Cachoeira Paulista (zona rural de São Paulo), enquanto que superestima para Alta

Floresta (situado na região Amazônica). Espera-se que os resultados para o clima Amazônico sejam melhorados com informações mais realísticas de vapor d' água e refletância de superfície R_{min} bem como com a inclusão da influência dos aerossóis. Estudos em andamento na DSA estão aperfeiçoando o algoritmo GL1.2 em relação a esses parâmetros: GL1.4 incluindo distribuições espaciais de w_2 e R_{min} e GL2.0 incluindo o efeito atenuante dos aerossóis.

Como atividades futuras, serão de grande utilidade:

- Avaliar se os padrões de acurácia do modelo mudaram com o uso do novo satélite GOES-16, comparando com os dados de anos anteriores provenientes da série histórica GL1.2 (por exemplo, com GOES-13);
- Expandir a série de dados utilizada na validação entre GL1.2 e medidas de superfície, incluindo um conjunto adicional de estações provenientes de diferentes redes com dados de radiação solar (por exemplo, redes SONDA e INMET);
- Prosseguir com o estudo de ciclos diurnos estimados pelo modelo GL1.2, incluindo ciclos com a versão GL1.4, bem como avaliando o desempenho para condições atmosféricas diversas e identificando fatores que podem produzir erros;
- Análise crítica das fontes de erro do modelo GL1.2 e quantificação do ganho obtido com a versão GL1.4 sobre o território brasileiro;
- Aperfeiçoar as rotinas construídas para a validação do produto GL1.2 e desenvolver esquema para implementação operacional na DSA;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOTTINO, M.J. **Um modelo de estimativa de radiação solar por satélite: análise e aprimoramentos**. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos - SP, 2000.

BRITTO, J. M. S., PORFÍRIO, A.C.S., CEBALLOS, J.C., COELHO, S.M.S.C. **Validação do modelo de radiação solar global do CPTEC versão GL 1.2 utilizando dados GOES-16**. In: XVI EPGMET – Encontro dos Alunos de Pós-Graduação em Meteorologia, 2017, Cachoeira Paulista. EPGMET 2017, 2017.

COSTA, S.M.S., et al. A Successful Practical Experience with Dedicated Geostationary Operational Environmental Satellites GOES-10 and -12 Supporting Brazil. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 99, p. 33-47, 2018.

CEBALLOS, J.C., MACEDO, L.O. **Uma base de dados de radiação solar na América do Sul, estimada por satélite (modelo GL1.2/CPTEC)**. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, PE, 2014.

CEBALLOS, J.C., BOTTINO, M.J., SOUZA, J.M. **A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery**. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004.

PORFÍRIO, A.C.S. **Uma Contribuição à Modelagem de Aerossol e Componentes da Radiação Solar no Modelo GL**. 136 f. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos - SP, 2017.

SCHMIT, T.J., GRIFFITH, P., GUNSHOR, M.M., DANIELS, J.M., GOODMAN, S.J., LEBAIR, W.J. **A Closer Look at the ABI on the GOES-R Series**. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 681–698, 2017.