



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL À SUPERFÍCIE NO ESTADO DO TOCANTINS

Stéphane Ferreira da Silva

Relatório final de iniciação científica orientada pela Dra. Simone Marilene Sievert da Costa Coelho e Dr. Hallan Souza de Jesus.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL À SUPERFÍCIE NO ESTADO DO TOCANTINS

Stéphane Ferreira da Silva

Relatório final de iniciação científica orientada pela Dra. Simone Marilene Sievert da Costa Coelho e Dr. Hallan Souza de Jesus.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sobrenome, Nomes.

Cutter Irradiância solar global à superfície no estado do Tocantins / Nome Completo do Autor1; Nome Completo do Autor2.
– São José dos Campos : INPE, 2023.
v + 26 p. ; ()

() – , São José dos Campos, .
: .

1. Palavra chave. 2. Palavra chave 3. Palavra chave. 4. Palavra chave. 5. Palavra chave I. Título.

CDU 000.000



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

Informar aqui sobre marca registrada (a modificação desta linha deve ser feita no arquivo publicacao.tex).

Informar aqui sobre fontes financiadoras (a modificação desta linha deve ser feita no arquivo publicacao.tex).

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 A importância da radiação solar	1
1.2 Instrumentos monitoram a radiação solar	1
1.3 Modelos computacionais que estimam a radiação solar	1
1.4 Descrição do Modelo GL	2
1.5 Avaliações das estimativas do Modelo GL	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3 OBJETIVOS	13
3.1 Objetivos gerais	13
3.2 Objetivos específicos	13
4 DADOS E MÉTODOS	15
5 RESULTADOS	17
5.1 Avaliação da versão GL1.4 para a região norte	17
5.2 Comportamento médio mensal de incidência solar	18
5.3 Estimativas da radiação PAR geradas pelo Modelo GL	19
6 CONCLUSÕES	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1 INTRODUÇÃO

1.1 A importância da radiação solar

Os sistemas de produção agrícola, são avaliados conforme a capacidade de produção vegetal, ou seja, o potencial agrônômico da cultura plantada, e este fator depende fortemente do ambiente e da quantidade de radiação disponível, além da temperatura do ar, variação em absorção de dióxido de carbono e todos outros fatores que afetam o crescimento. No planeta terra, ocorrem vários processos físicos, químicos e biológicos, ou seja, estudos que façam a ligação entre radiação e os seus efeitos no solo, vem ganhando cada vez mais importância. A energia radiante chega a terra de duas formas, a radiação solar direta e a radiação difusa (MORAES, 2002).

No âmbito dos efeitos na superfície terrestre, o foco é na radiação solar difusa, pois é ela que fornece a energia necessária para que as plantas realizem seu ciclo de vida. Existem três fatores básicos da ação da luz que são analisados, são eles: da ação da luz. As folhas das plantas absorvem a radiação que se divide em 3 formas: radiação direta, radiação difusa na atmosfera e radiação difusa na copa ou no dossel, ressaltando que mesmo tendo essa absorção, nem toda essa energia produz efeito fisiológico nos processos realizados pelas plantas. Quando as plantas recebem comprimentos de onda capazes de provocar a indução de respostas fisiológicas, essa radiação é chamada de radiação fisiologicamente ativa (PAI), quando há disponibilidade para realização da fotossíntese, é chamada então de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) (MORAES, 2002).

1.2 Instrumentos monitoram a radiação solar

Existem duas formas de se conhecer os níveis de radiação solar na superfície terrestre. Uma delas é mediante instrumentos espalhados pela Terra, um exemplo é o chamado piranômetro, utilizado para realizar a medição de radiação solar com qualidade e precisão, as estações meteorológicas são compostas por ele. Outro equipamento que também realizar medições, são sensores que detectam a radiação solar, as coletas de dados são em unidade de potência watts por metro quadrado (W/m^2).

1.3 Modelos computacionais que estimam a radiação solar

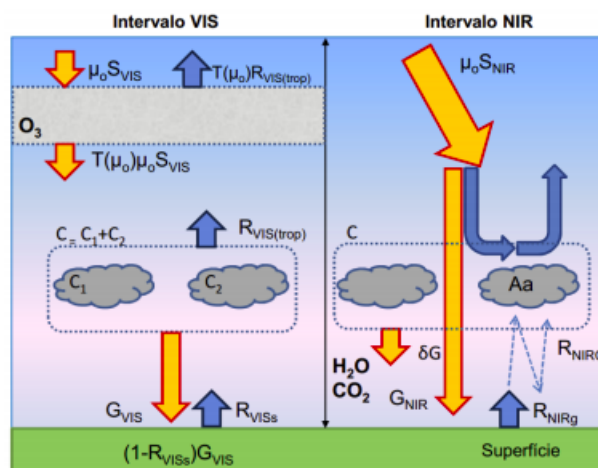
Com a modelagem computacional, as informações adquiridas com o uso dos instrumentos citados anteriormente, é possível modelar o caminho que a radiação percorre ao chegar no topo da atmosfera até chegar à superfície. Existem duas formas de análise e estimativa, os chamados "modelos estatísticos" e os "modelos físicos". Os

modelos de estimativa avaliam a relação entre dois fatores, o brilho que é observado num pixel no topo da atmosfera e a irradiância que incide sobre a superfície. Com o tempo, estes modelos foram sendo menos utilizados e os modelos físicos ganharam mais espaço, pois suas avaliações propostas são através das relações entre as duas grandezas citadas anteriormente, com base em dois critérios, as leis de propagação de radiação na atmosfera e em dados meteorológicos genéricos. Os modelos físicos apresentam, com relação aos modelos estatísticos, a vantagem de utilizarem as medições de redes à superfície apenas visando conferir a qualidade do algoritmo que está sendo proposto (CEBALLOS; BOTTINO, 2000).

1.4 Descrição do Modelo GL

No INPE existe um modelo computacional em operação há mais de 20 anos, chamado Modelo GL, que avalia a radiação solar na América do Sul baseado em imagens GOES-VIS. O esquema de fluxos considerados neste modelo estão visualizados na Figura 5.2. Com o funcionamento deste modelo, os conjuntos de valores de irradiância média diária fornecidos por ele, são utilizados juntamente com os de várias redes de plataformas coletoras de dados (PCDs) no território nacional brasileiro. Dados com erros grosseiros são rejeitados e realizado então um refinamento adicional que utiliza as propriedades estatísticas simples de diferença entre estimativa do modelo e observações à superfície (CEBALLOS; GALVÃO, 2007).

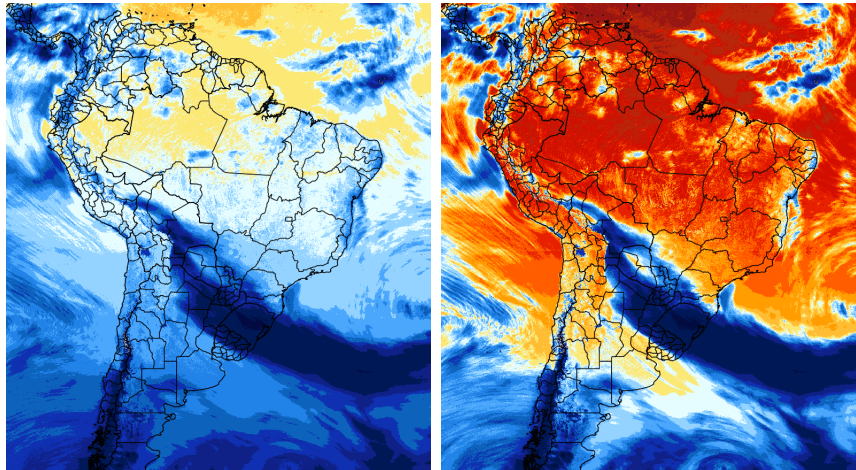
Figura 1.1 - Esquemática dos fluxos consideráveis no Modelo GL.



Fonte: Porfírio (2017).

As Figuras 1.2a e b exemplificam as estimativas geradas pelo Modelo GL.

Figura 1.2 - Estimativas do Modelo GL.



(a) Estimativa do espectro UV+VIS. (b) Estimativa da componente global da radiação.

Fonte: Acesso em <<https://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>> no dia 29-09-2023 às 13h.

1.5 Avaliações das estimativas do Modelo GL

O modelo GL realiza suas estimativas na região espectral de 0,28 a 2,8 μm a cada 10 minutos. Todos os dias, para cada imagem GOES que o modelo recebe, são gerados a partir delas, arquivos de irradiância, da mesma forma para sua integral diária (CEBALLOS; GALVÃO, 2007). O modelo GL considera o espectro de radiação do visível e do infravermelho próximo, sendo no primeiro considerado o balanço de energia na troposfera, e no segundo, que uma parte da radiação é absorvida pelo vapor de água e sofre reflectância múltipla entre a superfície e a base das nuvens.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Radiação, também chamada de energia radiante, é o tipo de energia na qual a sua propagação ocorre sem precisar que se tenha um meio material para que o processo ocorra. Além de se referir a esta forma de energia, o termo também é utilizado para se referir à transferência da mesma. Conforme acontece a sua propagação, a radiação pode se revelar de duas formas distintas, podendo ter uma natureza corpuscular (fóton), como também, se comportar como uma onda eletromagnética. Para a Física Moderna como realmente é a radiação, ou seja, seu comportamento, permanece sendo uma contínua fonte de estudo (VAREJÃO-SILVA, 2006). Tratando da natureza corpuscular da radiação ou propriamente da luz, até o período de Isaac Newton (1642-1727), grande parte dos estudiosos que compunham o ramo da ciência, acreditavam na teoria corpuscular da luz, em que um feixe luz tinha sua composição formada de pequenas partículas, denominadas de corpúsculos que se moviam com velocidade elevada e estas eram emitidas por fontes de luz (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

Para a meteorologia, o comportamento ondulatório é o objeto de real interesse. Dentro deste aspecto, a caracterização da radiação acontece pelo comprimento de onda (λ) como também pode ser pela frequência de oscilação (ν). A definição de um comprimento de onda é a distância entre duas cristas uma ao lado da outra, já para definir a frequência, entende-se pelo número de cristas que vai passar por um ponto de referência em um período de tempo. O comprimento de onda é utilizado as unidades de medida micrômetro (μm) ou em nanômetro, nm, ($1\mu\text{m} = 10^{-6}$ m e $1\text{nm} = 10^{-9}$ m), a sequência em ciclos por segundo, ou seja, a frequência é expressa em Hertz (Hz). Dessa forma, a frequência das ondas eletromagnéticas, é a quantidade de oscilações que o campo magnético a qual ela pertence irá realizar por segundo, quanto maior a frequência, mais energia irá carregar.

A velocidade da propagação da luz no vácuo (c) é resultado do produto do comprimento de onda (λ) pela frequência de oscilação (ν): $c = \nu \cdot \lambda$. Através deste cálculo é perceptível o quanto a transformação da frequência em comprimento de onda e da mesma forma o comprimento de onda em frequência. As radiações das quais se tem conhecimento, varia seu comprimento desde 10^{-10} cm (raios gama) até cerca de 107 cm (ondas longas de rádio) (VAREJÃO-SILVA, 2006). O espectro eletromagnético é conhecido pelo conjunto de todos esses comprimentos de onda. Conforme a sua frequência, as ondas são classificadas da menor à maior energia, por exemplo: raios gama, raios X, ultravioleta (UV), visível (VIS), infravermelho próximo (NIR),

infravermelho solar (IRS), infravermelho termal (IR), microondas, ondas de rádio.

Mesmo que sejam conhecidas radiações com diferentes comprimentos de onda, o que é visível aos olhos humanos e é interpretado pelo cérebro, que constituem dessa forma a chamada, faixa visível do espectro eletromagnético ou luz visível, são os comprimentos de onda que estão compreendidos entre 0,4 e 0,7 μm (LIU, 2002). Com a luz visível, os humanos conseguem enxergar as cores: violeta (0,36 a 0,42 μm); índigo-azul (0,42 a 0,49 μm); verde (0,49 a 0,54 μm); amarelo (0,54 a 0,59 μm); laranja (0,59 a 0,65 μm); vermelho (0,65 a 0,74 μm). Entretanto, esses intervalos de cores não são exatos, não seguem regras, ou sejam são valores aproximados, dessa forma não há limites perceptíveis entre as cores, como pode ser observado em um arco-íris, a passagem de uma cor para outra acontece gradualmente (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A luz vermelha é visível aos olhos humanos, mas a radiação possui um comprimento de onda maior que este tipo de radiação, ou seja, menor que 0,74 μm , são invisíveis e chamadas de radiação infravermelha. Mesmo que não estejam na faixa visível, seus efeitos podem ser percebidos, pois as radiações infravermelhas possuem propriedades de aquecimento. Tendo também a região do ultravioleta, que são ondas que o comprimento de onda é inferior a 0,36 μm , frequência esta que é superior à da luz violeta. Tem-se, assim, três faixas do espectro eletromagnético: radiação ultravioleta, faixa de luz visível e radiação infravermelha (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A equipe de pesquisa do Instituto de Energia Nuclear de Obninsk, na Rússia, e do Instituto Russo de Radiologia e Agroecologia (IRRA), concluiu que a radiação apresenta influência nas plantas com relação ao seu desenvolvimento e estrutura genética, mas não afeta a sua reprodução, quando a exposição ocorre de maneira crônica. Entretanto, conforme o comprimento de onda que a radiação possui, existem variados efeitos sobre as plantas, como a morte das plantas (ultravioleta), inibição do crescimento (ultravioleta e violeta), acentuada absorção pela clorofila e xantofila, entre outros efeitos (CHANG, 1968).

Segundo o Princípio de Prevot, todo corpo que esteja com temperatura acima de 0 K (graus Kelvin) ocorrerá a emissão e absorção de radiação. Tanto o conceito de emissão, quanto o de absorção, incluem a passagem de um elétron de um nível de energia para outro. No caso da emissão de radiação, acontece quando o elétron passa de um nível superior para um inferior, emitindo um fóton. A absorção é o processo inverso, este acontece quando um elétron sendo excitado passa de um nível inferior para outro superior, neste caso, ocorre a absorção de um fóton (VAREJÃO-SILVA,

2006).

Para que um elétron excitado passe de um nível superior para o inferior é necessário que haja a emissão de uma quantidade de radiação denominada *quantum* (ΔE), esta é uma quantidade pequena e finita. Na mudança de nível é produzida uma frequência da radiação diretamente proporcional à quantidade de energia emitida. O processo de absorção acontece de maneira análoga, mas tendo suas características específicas, ou seja, com a passagem de um elétron para um nível de energia mais alto, dizendo assim que ele está excitado. Logo o elétron retorna a seu estado de energia mais baixo, com isso é emitida energia radiante, nesse processo, o átomo irá perder temporariamente a energia que adquiriu quando o elétron foi promovido (HEWITT, 2015).

Quando o elétron passa para um nível inferior de energia, ocorre a emissão de um pulso oscilante de radiação eletromagnética a cada um desses saltos, esse pulso é denominado fóton, a sua energia possui relação com a diferença de energia cuja correspondência é direta com o salto. Para compreender melhor o que é um fóton, é válido pensar como este sendo um corpo pequeno, que o átomo ejeta, sendo este corpúsculo localizado de pura energia (HEWITT, 2015).

A teoria quântica fala a respeito da absorção e emissão de radiação nas dimensões de átomos. Segundo esta teoria, os fatores para que esses fenômenos aconteçam são em apenas comprimentos de ondas específicos, dependendo também do estado de agregação molecular que a substância se encontre. A quantidade de energia radiante (Q_e) recebida, transmitida ou emitida por unidade de tempo é chamada de fluxo de radiação (F_e), expressando na fórmula: $F_e = dQ_e / dt$. Fluxo radiante é o que costuma-se chamar desta forma, o fluxo de radiação por unidade de área (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Dentro dos estudos sobre radiação, as variáveis podem ser designadas por diferentes termos, contudo buscando formas de tornar as denominações unificadas, a Organização Meteorológica Mundial (O.M.M.), faz a todos os países a recomendação de adotar universalmente a seguintes grandezas: emitância (M_e) e irradiância (E_e). A emitância é a grandeza definida como o fluxo emitido por unidade de área (A), ou seja, a quantidade de fluxo de radiação que a superfície/área irá emitir, sua expressão algébrica é: $M_e = dF_e/dA = d^2Q_e/(dAdt)$. Já a irradiância (E_e), este termo representa o fluxo incidente por unidade de área, ou seja, a quantidade do fluxo que irá atingir a área, sendo expresso da seguinte forma: $E_e = dF_e/dA = d^2Q_e/(dAdt)$. Estas duas grandezas são descritas utilizando o Watt por metro quadrado (W/m^2), ou

a caloria por centímetro quadrado por minuto ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A radiância traduz a intensidade de energia por unidade de área normal à direção da propagação. A linha espectral é o intervalo infinitesimal de comprimentos de onda, ou seja, com valores mais próximos a zero do qualquer outro número real, mas que é diferente de zero. Para essa situação, trata-se a respeito de fluxo monocromático, intensidade monocromática, dentre outros, o uso do termo “monocromático” não se relaciona com a faixa visível, e sim, somente a uma específica linha do espectro (VAREJÃO-SILVA, 2006). Com a intenção de ter uma melhor compreensão sobre a radiação, foram desenvolvidas várias leis que possibilitam o entendimento de todo o funcionamento e utilização da radiação. Uma destas leis é a chamada “corpo negro”, em resumo esta lei fala que toda radiação refletida sobre ele é absorvida, ou seja, que o corpo absorve toda radiação incidida sobre ele. Esta é uma lei conceitual, mas tem uma grande importância, porque na realidade existem corpos que apresentam esse tipo de comportamento em algumas faixas da região infravermelha do espectro (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Um exemplo de fácil compreensão sobre corpos normais que podem se comportar como corpos negros, é uma brasa incandescente, a uma certa proximidade dela pode-se sentir um aquecimento proporcionado por ela, o calor exalado por ela é sob forma de radiação eletromagnética. O carvão ao ser queimado permite que seja observado uma radiação avermelhada sendo adquirida. Por este material possuir uma coloração preta, não reflete luz, mas quando chega em temperaturas que sejam altas o suficiente, ocorre a emissão na região do visível do espectro eletromagnético (ANTUNES, 2012). Desta forma, a simulação de como estes corpos se comportam com a radiação é possível através do comportamento radiativo do corpo negro.

A lei de Kirchhoff, trata sobre a emissão de radiação por corpos. Gustav Kirchhoff, em seus estudos propôs a sua lei da emissão térmica no ano de 1859, comprovando-a em 1861, propondo ainda o nome de “radiação do corpo negro” em 1862 ANTUNES (2012) fez a sugestão de que quando um corpo atinge determinada temperatura emitirá radiação num certo comprimento de onda. O entendimento completo deste estudo só foi possível depois do desenvolvimento da teoria quântica. O corpo negro, por definição para qualquer comprimento de onda tem: $a_\lambda = 1$. Desta forma, verifica-se: M_λ (emitância monocromática) = $E(\lambda, T)$ (emissividade monocromática) (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Josef Stefan e Ludwing Boltzmann, foram os responsáveis por mais uma lei da

radiação, a Lei de Stefan-Boltzman. Com esta lei, é determinada a temperatura para o corpo negro emitir a radiação e ela está associada ao comprimento de onda da radiação. No ano de 1879, Stefan realizou experimentos, a partir dos quais ele conseguiu mostrar a proporção entre a temperatura e a radiação emitida pelo corpo negro, sendo esta proporcional à quarta potência da temperatura absoluta. Em 1884, Boltzmann, comprovou teoricamente essa proporcionalidade, graças a Termodinâmica (VAREJÃO-SILVA, 2006). A Lei de Stefan-Boltzman é traduzida com a seguinte expressão analítica para o corpo negro: $Me = \int Me_{\lambda}d\lambda = \int E(\lambda, T)d\lambda = \sigma T^4$ (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Leis de Wien também tratam a respeito da relação entre a energia e a temperatura. Para a física esta lei com a sua equação ($T\lambda_m = 2897 \mu\text{K}$) revela que a relação que a temperatura terá com a radiação, também envolve a superfície emissora, pois ela diz que, quanto maior for a temperatura desta superfície, o comprimento de onda da radiação emitida, será mais aproximado do ultravioleta e emitida com maior intensidade (VAREJÃO-SILVA, 2006). Tratando de mais uma das leis da radiação, Planck foi o responsável pela “Lei de Planck”, abordando novamente sobre energia, essa lei fala qual é a energia emitida pelo corpo, ao ter uma temperatura e um comprimento de ondas específicos. Planck em seus estudos, imaginou como a radiação era absorvida e emitida, decidindo que isso acontecia em quantidades pequenas e discretas e nomeou-as de quanta (VAREJÃO-SILVA, 2006).

O sol emite a chamada “radiação solar”, atualmente o que se acredita sobre a origem da energia solar é de reações termonucleares, esse processo acontece em quase todos os comprimentos de onda e por todo o espaço. A radiação solar é emitida pela superfície do astro e da quantidade que chega a superfície terrestre 52% está na faixa espectral do infravermelho, 44% na faixa de luz visível e 4% na do ultravioleta (LEMON, 1965). A chamada radiação global, é a energia solar que atinge a superfície terrestre em instantes e locais específicos. Essa radiação global é o somatório de duas componentes: a radiação direta e a difusa (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A radiação direta, ela é provida diretamente do disco solar, isso irá acontecer no momento em que ele se mostrar total ou parcialmente visível. A radiação difusa é o resultado da ação de espelhamento da atmosfera, esse tipo de energia sofrerá desvios, podendo ser um ou mais, até que atinja o local considerado (VAREJÃO-SILVA, 2006).

O planeta Terra realiza movimentos constantes, um deles é o de translação, durante esta movimentação, a Terra vai se afastar e se aproximar constantemente do Sol, in-

fluenciando assim na quantidade de energia interceptada do astro solar pelo planeta. Outro conceito importante envolvendo a radiação é a chamada constante solar. Esse termo se refere à quantidade de radiação solar por unidade de área. A constante solar é a quantidade de energia que o Sol provém, que na unidade de tempo, vai sofrer a interceptação de uma superfície plana, de uma unidade de área, sendo perpendicular à direção dos raios solares e situada a uma distância do Sol igual à distância média da Terra e o Sol, mas sem sofrer influência da atmosfera (VAREJÃO-SILVA, 2006). O espectro solar é mais complexo do que o estudado para um corpo negro, o Sol possui diferentes formações e cada uma destas emite assim como um corpo negro à respectiva temperatura, só que a emissão é respectiva à temperatura média da fotosfera.

Os feixes de luz monocromáticos de radiação solar ao atravessarem um meio absorvente são enfraquecidos. Isso quer dizer que, quanto mais concentrada for a substância absorvente, menor vai ser a intensidade de um feixe de luz, esse efeito acontece exponencialmente à medida que ocorre o aumento aritmeticamente da concentração do meio absorvente (VAREJÃO-SILVA, 2006). A lei que explica e demonstra esses conceitos é a Lei de Beer.

Segundo Beer, ao atravessar um meio absorvente, um feixe de radiação monocromático de radiação solar é suavizado. Esse processo pode acontecer de duas formas, por absorção, como também por espalhamento (difusão), este último, quanto menor for o comprimento de onda da radiação, passa a ser tão mais eficiente.

A Lei de Beer é expressa da se I_λ representar a intensidade da radiação que incide no topo de uma camada de material absorvente de espessura dz , a atenuação I_λ aceita é dada pela Lei de Beer (HALTNIER; MARTIN, 1957):

$$dI_\lambda = -K_\lambda \rho ds I_\lambda \cdot I_\lambda \quad (2.1)$$

Na equação ρ representa a densidade do meio e ds , o percurso efetuado pela radiação ao atravessar a camada em questão. K_λ tem dimensões L^2/M e é chamado coeficiente mássico de absorção, conforme o comprimento de onda este fator irá variar, além de que, com a pressão e temperatura, também sofrerá variações (BERRY et al., 1945). Dando continuidade aos componentes da fórmula, o sinal negativo na frente de K_λ , é com o objetivo de revelar que há uma atenuação na intensidade.

Existe o chamado saldo de radiação, que diz respeito à diferença entre os ganhos e

perdas radiativas, sendo estes em relação a uma área de controle, plana, horizontal e situada próximo à superfície terrestre (VAREJÃO-SILVA, 2006). A radiação global e a radiação infravermelha emitida pela atmosfera para a superfície representam os ganhos do saldo de radiação à superfície. E as perdas são representadas pela radiação refletida e a emitida pela própria superfície da terra. A radiação de ondas longas, é a gerada pela atmosfera terrestre e sua superfície, ambas têm comportamento aproximado ao de um corpo negro com relação as suas respectivas temperaturas (VAREJÃO-SILVA, 2006). A atmosfera emite radiação infravermelha, contudo esse fato depende da concentração instantânea dos constituintes radioativamente ativos, com destaque para água em todas as suas fases, o dióxido de carbono e o ozônio. Como o dióxido de carbono e ozônio tem suas concentrações praticamente inalterável, mudanças na umidade específica do ar e na distribuição de gotículas de água e de cristais de gelo em suspensão (nuvens, nevoeiros, névoa úmida), causam variações mais acentuadas no que diz respeito sobre a emissão e absorção atmosféricas. O comportamento radiativo da atmosfera também pode sofrer mudanças significativas devido à presença anormal de poeira (VAREJÃO-SILVA, 2006).

O conhecido “efeito estufa” é o resultado do acúmulo de radiação, quando os níveis de nebulosidade, umidade do ar e poluição estão altos, pois menores serão as perdas de radiação para níveis elevados da atmosfera e então para o espaço. O saldo da radiação infravermelha, ou também chamado saldo de radiação de ondas longas, é constituído pela diferença entre a radiação de ondas longas que chega à superfície, proveniente da atmosfera e a emitida pela superfície para a atmosfera.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos gerais

Fazer uma avaliação da qualidade das estimativas do modelo e realizar uma análise espacial preliminar para identificar padrões de incidência da radiação solar no estado do Tocantins.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar o padrão de incidência da radiação solar no estado do Tocantins através da modelagem computacional.
- Avaliar o comportamento médio da incidência da radiação solar e determinar qual é o padrão de incidência dentro do Tocantins.
- Avaliar a qualidade das estimativas do Modelo GL.

4 DADOS E MÉTODOS

As fontes dos dados utilizados neste trabalho são a modelagem numérica que estimam a radiação solar e observações à superfície realizada por instrumentos. Foram utilizadas estimativas do Modelo GL para a região de interesse, o Norte e mais especificamente, o estado do Tocantins. As medidas são àquelas disponíveis pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Um dos dados de entrada do Modelo GL é o conteúdo de vapor de água presente na atmosfera, que varia ao longo da América do Sul. O estado do Tocantins se encontra numa região transitória com relação ao fator reflectância que na Amazônia é baixa e no nordeste pode ser observado uma alta reflectância. A média mensal dos valores de reflectância se mantém a mesma, contudo os valores diários sofrem variações conforme a presença de nuvens. As imagens de satélite funcionam como uma variável instantânea, pelo fato de que os campos de nuvem são vistos apenas pelo satélite, é através dele que o modelo vai saber se há ou não nuvens.

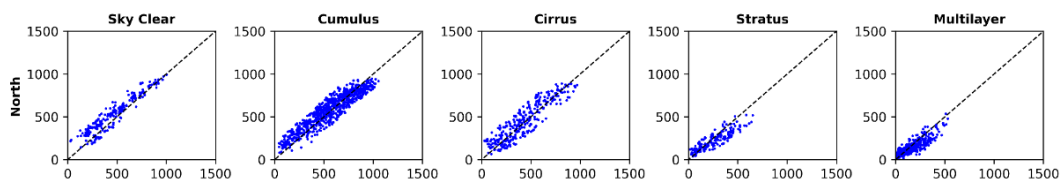
A metodologia deste trabalho buscou avaliar as estimativas do Modelo GL e estudar o comportamento de incidência da radiação solar no Tocantins, assim como realizado no trabalho de Jesus (2023). Os períodos de análise são os meses de janeiro e julho de 2020 e análises espaciais preliminares para 15 UTC. Uma avaliação estatística dessa variável foi realizada para determinar o padrão de incidência da radiação solar. As métricas estatísticas utilizadas foram: erro médio (BIAS), desvio padrão das diferenças entre estimativa e observação (σ), erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de correlação (r) e índice de willmott (dw). Também, diante da necessidade do tema para as áreas agrárias, foi realizado um estudo prévio para observar a capacidade do Modelo GL em estimar a componente da radiação fotossinteticamente ativa (PAR).

5 RESULTADOS

5.1 Avaliação da versão GL1.4 para a região norte

Os gráficos da Figura 5.1 apresentam as dispersões dos dados em diferentes classes de nuvens. Observa-se que em todas as indicações, o modelo acompanha os valores das medidas do instrumento. As estimativas para classe de nuvens cirrus apresenta as maiores dispersões. Na condição de céu claro, o modelo superestima as observações nos eventos de menores valores de irradiância solar global.

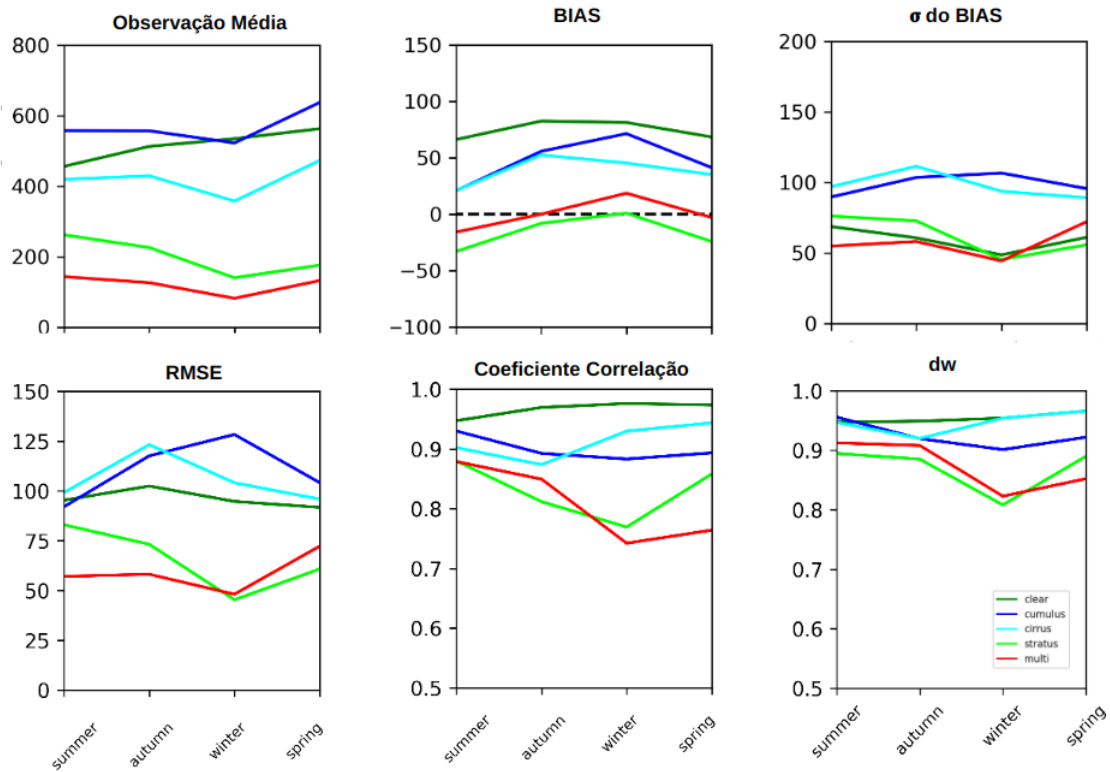
Figura 5.1 - Avaliação estatística do Modelo GL.



Fonte: Autor.

As Figuras 5.2 apresentam as avaliações das estimativas do modelo da versão 1.4 nas classes de nuvens segundo as indicações do Classificador de Nuvens. A diferença média entre modelo e observação (BIAS) mostra que os maiores valores correspondem à classe de céu claro, posteriormente, as classes de cumulus e cirrus. Em todas as condições, mostra-se que os desvios estão entre -30 e 70 W/m^2 e os valores de coeficiente de correlação são superiores à 0.7 .

Figura 5.2 - Avaliação estatística do Modelo GL.

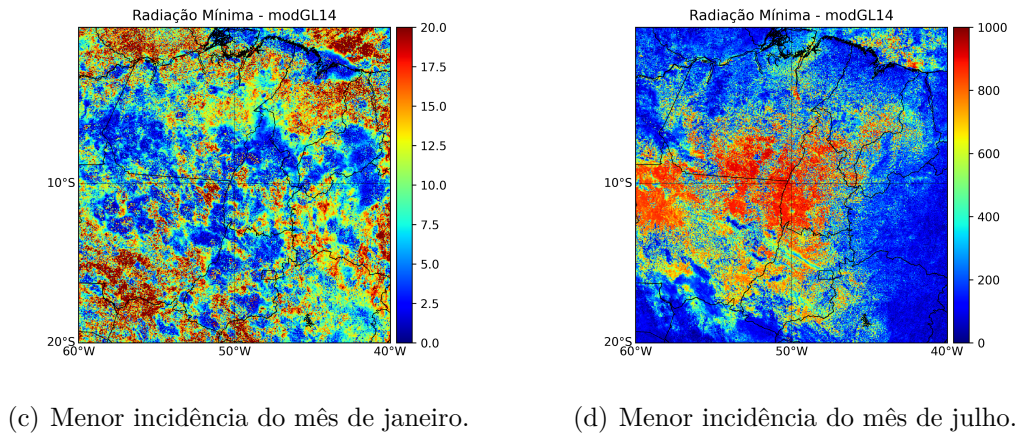
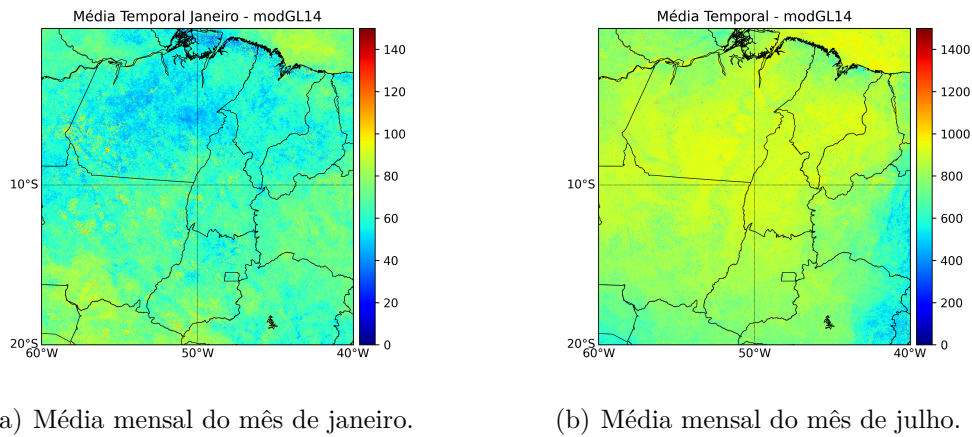


Fonte: Autor.

5.2 Comportamento médio mensal de incidência solar

A incidência média mensal dos meses de janeiro e julho são apresentadas nas Figuras 5.3. Observa-se que a média mensal do mês de janeiro possui menor incidência quando comparada às estimativas para a média mensal de julho. As possíveis hipóteses para este comportamento são a ocorrência de nuvens oriundas da região amazônica, enquanto o mês de julho possui menor ocorrência de nuvens. Estes são as mesmas justificativas para os valores das incidências mínimas da radiação solar. Em relação ao estado do Tocantins, observa-se uma região característica para incidência solar no horário de análise.

Figura 5.3 - Avaliação estatística do Modelo GL.



Fonte: Autor.

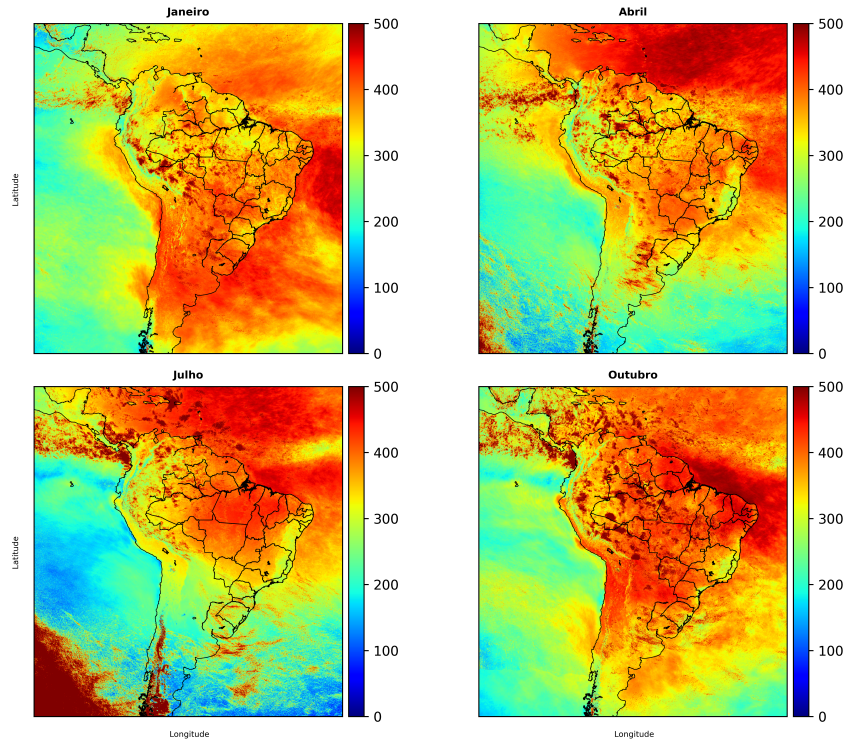
5.3 Estimativas da radiação PAR geradas pelo Modelo GL

Os valores médios mensais de radiação solar incidente no Brasil durante o ano de 2020 exibiram uma variação entre 300 e 500 W/m², conforme ilustrado na Figura 5.4. Observa-se que os meses de julho e outubro se destacaram ao apresentarem os valores mensais mais elevados, sendo que a região Sul do país, em particular no mês de julho, foi caracterizada por uma incidência significativamente alta.

Notavelmente, foi identificada uma faixa costeira de valores mais baixos ao longo dos estados do nordeste do Brasil, estendendo-se até os estados de Espírito Santo e Rio de Janeiro, com especial ênfase no mês de julho. No entanto, é relevante mencionar que, no mês de julho, a ausência de cobertura de nuvens contribuiu para um aumento

substancial na incidência da radiação PAR na superfície, particularmente nos estados do Mato Grosso, Goiás e na porção oeste da Bahia.

Figura 5.4 - Campos de radiação PAR média mensa.

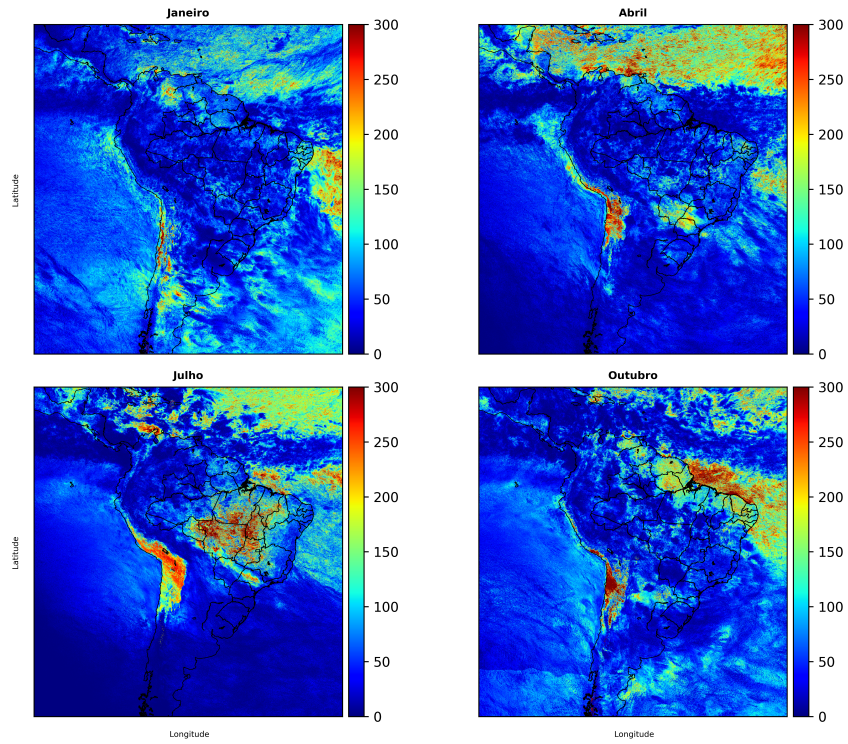


Fonte: Autor.

A incidência média mensal da radiação PAR demonstra consistência com os resultados previamente relatados por Frisina et al. (2000), os quais indicam valores variando entre 300 e 600 W/m^2 para a cidade de Botucatu (SP). No contexto da mesma localidade, o modelo em questão apresenta valores situados na faixa de 300 a 450 W/m^2 .

Os registros dos valores mínimos mensais (conforme representados na Figura 5.5) revelam que o mês de julho se destaca ao exibir os valores mais elevados, com uma ênfase particular na região central continental e norte do Chile, aproximando-se de aproximadamente 300 W/m^2 . Em contraste, o mês de abril revela uma região com níveis significativamente elevados na divisa entre os estados de São Paulo e Paraná, alcançando aproximadamente 250 W/m^2 .

Figura 5.5 - Campos de radiação PAR mínima mensal.



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÕES

Este estudo conclui que as estimativas geradas pelo modelo são consistentes com as observações realizadas, e a análise espacial permite a identificação de áreas predominantes de incidência de radiação solar. É importante ressaltar que os principais fatores que afetam a propagação da radiação solar na atmosfera são a presença de nuvens e, conseqüentemente, a topografia, devido ao papel da convecção na formação das nuvens.

Os resultados obtidos na avaliação das estimativas de radiação PAR demonstraram semelhanças com os valores apresentados na literatura, indicando que o Modelo GL pode ser uma valiosa ferramenta para fornecer estas informações na América do Sul. Além disso, destacam-se os padrões observados nas regiões costeiras do nordeste e norte, onde possíveis influências da brisa marítima podem explicar as reduções nas estimativas de radiação PAR. No entanto, é importante ressaltar que o Modelo GL representa uma contribuição adicional para os estudos relacionados à saúde das plantas, sendo assim, é sugerido que estudos futuros venham avaliar estas estimativas com valores medidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES, L. C. S. Relatório de estágio: radiação de corpo negro, lei de stefan-boltzmann, lei do deslocamento de wien. **Covilhã: Universidade da Beira Interior**, 2012. 8
- BERRY, F. A.; BOLLAY, E.; BEERS, N. R. **Handbook of Meteorology**. [S.l.]: McGraw-Hill, New York, 1945. 10
- CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J. Modelo cptec gl para estimativa de radiação solar por satélite: versões gl1.0 e gl1.1. In: **Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro**. [S.l.: s.n.], 2000. 2
- CEBALLOS, J. C.; GALVÃO, A. M. Um estimador da qualidade do modelo gl-cptec de radiação solar por satélite. In: **XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Aracaju**. [S.l.: s.n.], 2007. 2, 3
- CHANG, J. **Climate and Agriculture: an ecological survey**. [S.l.]: Aldine, Chicago, 1968. 6
- FRISINA, V. A.; ESCOBEDO, J.; GOMES, E. Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa (par) em estufa de polietileno. In: **ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**. [S.l.: s.n.], 2000. 20
- HALTNIER, D. J.; MARTIN, F. L. **Dynamical and Physical Meteorology**. [S.l.]: McGraw-Hill, New York, 1957. 10
- HEWITT, P. G. **Física conceitual**. [S.l.]: 12. ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora Ltda, 2015. 7
- JESUS, H. S. de. **Análise do impacto de nuvens na qualidade das estimativas do Modelo GL: inclusão de canais ABI/GOES-16 no espectro solar**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 5 2023. 15
- LEMON, E. R. **Energy Conversion and Water Use Efficiency in Plants**. [S.l.]: Plant Environment and Efficient Water Use, 1965. 9
- LIU, K. **An Introduction to Atmospheric**. [S.l.]: Academic Press, 2002. 6
- MORAES, C. R. A. **Radiação solar, desenvolvimento e produção de palmitos de pupunha (Bactris gasipaes H.B.K.) em sistemas agroflorestais na Amazônia ocidental**. 98 p. Tese (Curso de Agronomia) — Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 2002. 1
- PORFÍRIO, A. C. S. **Uma contribuição à modelagem de aerossol e componentes da radiação solar no Modelo GL**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/11.27.20.22/doc/publicacao.pdf>, 11 2017. 2

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. [S.l.]: 2 ed. Recife: Pax, 2006. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física 4: ótica e física moderna**. [S.l.]: 12. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 5