



**LUIZ ELPÍDIO DE MELO MACHADO**

**MODELOS NÃO LINEARES APLICADOS NA DESCRIÇÃO  
DO ACÚMULO DA IRRADIAÇÃO GLOBAL DIÁRIA NO  
NÍVEL DO SOLO**

**LAVRAS - MG  
2024**

**LUIZ ELPÍDIO DE MELO MACHADO**

**MODELOS NÃO LINEARES APLICADOS NA DESCRIÇÃO DO ACÚMULO DA  
RADIAÇÃO GLOBAL DIÁRIA NO NÍVEL DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Joel Augusto Muniz  
Orientador

Prof. Dr. Edilson Marcelino Silva  
Coorientador

**LAVRAS -MG  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Machado, Luíz Elpídio de Melo.

Modelos não lineares aplicados na descrição do acúmulo da  
radiação global diária no nível do solo / Luíz Elpídio de Melo

Machado. - 2024.

205 p. : il.

Orientador(a): Joel Augusto Muniz.

Coorientador(a): Edilson Marcelino Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Regressão não linear. 2. Modelos sigmoidais. 3. Irradiação  
em biomas. I. Muniz, Joel Augusto. II. Silva, Edilson Marcelino.  
III. Título.

**LUIZ ELPÍDIO DE MELO MACHADO**

**MODELOS NÃO LINEARES APLICADOS NA DESCRIÇÃO DO ACÚMULO DA  
RADIAÇÃO GLOBAL DIÁRIA NO NÍVEL DO SOLO**

**NON-LINEAR MODELS APPLIED TO DESCRIBE THE ACCUMULATION OF  
DAILY GLOBAL RADIATION AT GROUND LEVEL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 05 de março de 2024.

Joel Augusto Muniz	UFLA
Edilson Marcelino Silva	UFRRJ
Tales Jesus Fernandes	UFLA
Silvio de Castro Silveira	FEOL
Camilla Marques Barroso	UFLA

Prof. Dr. Joel Augusto Muniz  
Orientador

Prof. Dr. Edilson Marcelino Silva  
Coorientador

**LAVRAS –MG  
2024**

À minha esposa, Marta, pela cumplicidade incondicional em meus sonhos, especialmente durante a trajetória deste estudo.  
Aos meus filhos, Marina e Luiz Felipe, pelo apoio e compreensão constantes.  
Aos meus pais, Dona Nina e Sô Thomaz (in memoriam), pelo carinho e dedicação que sempre me acompanharam.  
DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Minha gratidão a Deus, por ter me concedido a saúde e a capacidade necessárias para a realização deste sonho.

Aos meus familiares, pelo constante apoio e motivação. Dedico um especial agradecimento ao tio Alfredo (in memoriam) e à tia Doca, cujo incentivo e apoio inicial foram fundamentais em 1977, quando iniciei minha formação profissional.

Ao professor Joel, manifesto minha profunda gratidão pela orientação, atenção e valiosos ensinamentos transmitidos ao longo deste trabalho. Agradeço também por ter me aceitado como seu orientando. Ao professor Edilson, sou igualmente grato pela dedicação e paciência no papel de coorientador.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária, pelo conhecimento compartilhado, especialmente ao professor Renato, pelo apoio inicial.

Felizmente, nesta jornada, contei com o auxílio de colegas atenciosos, aos quais sou extremamente grato.

Ao grupo de estudo em Regressão Não Linear Aplicada (NLIN), especialmente ao professor Tales, meu sincero agradecimento.

À Universidade Federal de Lavras, agradeço pela oportunidade de realizar a pós-graduação, proporcionando um ensino de qualidade e gratuito.

Aos funcionários do Departamento de Estatística (DES), pela atenção e cordialidade.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Admitir o erro e a incerteza é um ato de humildade intelectual, pois somente Deus “... sabe o que há na terra e no mar; e não cai uma folha (da árvore) sem que Ele disso tenha ciência; ...”  
(6ª Surata, versículo 59)

## RESUMO

A irradiância solar é o fluxo de radiação eletromagnética proveniente do Sol que chega à superfície da Terra. A radiação solar é uma fonte fundamental de energia no planeta, influenciando diretamente o desenvolvimento de espécies vegetais e fenômenos meteorológicos. Além disso, é utilizada em processos de secagem, aquecimento e produção de energia elétrica, entre outros. A intensidade da irradiação solar que atinge o solo sofre variações devido à rotação do planeta, que está associada à hora do dia; à inclinação do eixo da Terra e à sua translação ao redor do Sol, que originam os equinócios e os solstícios. Outro fator que interfere na irradiação solar é a atmosfera, que absorve ou dispersa os raios solares pela presença de aerossóis e nuvens. O acúmulo da irradiação solar global no nível do solo ao longo do dia apresenta uma característica sigmoide. O objetivo deste trabalho foi avaliar a adequação de modelos não lineares para descrever o acúmulo diário da irradiação solar global ( $\text{kJ/m}^2$ ) no solo, utilizando dados do INMET de dezessete cidades brasileiras representativas de cinco diferentes biomas. Os dados de irradiação global foram extraídos do Histórico de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes às cidades brasileiras localizadas nos biomas Amazônia (Rio Branco, Manaus, Humaitá, Macapá), Cerrado (São Luís, Brasília, Campo Grande), Caatinga (Petrolina, Mossoró), Mata Atlântica (Vitória, Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte, Curitiba, Recife) e Pampa (Santa Maria, Santa Vitória do Palmar). Para ajustar os modelos à irradiação global acumulada diária no nível do solo durante os solstícios e equinócios, foram escolhidos os modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Richards. O software R foi utilizado para o ajuste, empregando o método dos mínimos quadrados, implementado pelo algoritmo de Gauss-Newton. Na análise de resíduos, foram aplicados os testes de Shapiro-Wilk, Breusch-Pagan e Durbin-Watson. A qualidade dos ajustes foi avaliada pelos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do desvio padrão residual (DPR) e do critério de informação de Akaike (AIC). Os resultados indicaram que o modelo Logístico foi o que melhor se ajustou em 43 dos 68 conjuntos de dados, seguido pelo modelo Gompertz, que se destacou em 25 conjuntos. O modelo von Bertalanffy, quando atendeu aos pressupostos, apresentou resultados inferiores nos critérios de seleção, e o modelo Richards não convergiu. Dessa forma, evidencia-se que o modelo Logístico foi o mais adequado para os dados analisados. As abscissas dos pontos de inflexão estimadas pelo modelo Logístico apresentaram uma correlação muito forte com a longitude, assim como as abscissas estimadas pelo modelo Gompertz. No Bioma Mata Atlântica, as correlações entre os valores assintóticos e as latitudes, assim como entre as abscissas dos

pontos de inflexão e as longitudes, foram negativas e muito fortes, permitindo estimar parâmetros do modelo em cidades que não possuem estações meteorológicas.

**Palavras chaves:** regressão não linear; modelos de acúmulo; modelos sigmoidais; irradiação em biomas; coordenadas geográficas.

## ABSTRACT

Solar irradiance is the flux of electromagnetic radiation from the Sun that reaches the Earth's surface. Solar radiation is a fundamental source of energy on the planet, directly influencing the development of plant species and meteorological phenomena. Additionally, it is used in drying processes, heating, and electricity generation, among other applications. The intensity of solar radiation reaching the ground varies due to the rotation of the planet, which is associated with the time of day; the tilt of the Earth's axis and its orbit around the Sun, which cause equinoxes and solstices. Another factor that affects solar irradiance is the atmosphere, which absorbs or scatters solar rays due to the presence of aerosols and clouds. The accumulation of global solar irradiance at ground level throughout the day presents a sigmoidal characteristic. This study aimed to evaluate the suitability of nonlinear models to describe the daily accumulation of global solar irradiance ( $\text{kJ/m}^2$ ) at ground level using data from INMET for seventeen Brazilian cities representative of five different biomes. The global irradiance data were extracted from the Historical Meteorological Data of the National Institute of Meteorology (INMET) for Brazilian cities located in the Amazon biome (Rio Branco, Manaus, Humaitá, Macapá), Cerrado (São Luís, Brasília, Campo Grande), Caatinga (Petrolina, Mossoró), Atlantic Forest (Vitória, Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte, Curitiba, Recife), and Pampas (Santa Maria, Santa Vitória do Palmar). To fit the models to the daily accumulated global irradiance at ground level during solstices and equinoxes, the Logistic, Gompertz, von Bertalanffy, and Richards models were chosen. The R software was used for the fitting, employing the least squares method implemented by the Gauss-Newton algorithm. In the residual analysis, the Shapiro-Wilk, Breusch-Pagan, and Durbin-Watson tests were applied. The quality of the fits was evaluated by the values of the coefficient of determination ( $R^2$ ), residual standard deviation (RSD), and Akaike information criterion (AIC). The results indicated that the Logistic model was the best fit in 43 of the 68 datasets, followed by the Gompertz model, which performed well in 25 datasets. The von Bertalanffy model, when assumptions were met, presented inferior results in the selection criteria, and the Richards model did not converge. Therefore, the Logistic model proved to be the most suitable for the analyzed data. The abscissas of the inflection points estimated by the Logistic model showed a very strong correlation with longitude, as did the abscissas estimated by the Gompertz model. In the Atlantic Forest biome, the correlations between the asymptotic values and latitudes, as well as between the abscissas of the inflection points and longitudes, were

negative and very strong, allowing for the estimation of model parameters in cities that do not have meteorological stations.

**Keywords:** nonlinear regression; accumulation models; sigmoidal models; irradiation in biomes; geographic coordinates.

## INDICADORES DE IMPACTO

O fluxo de irradiação solar global varia ao longo do dia, e o acúmulo dessa energia apresenta um comportamento sigmoidal, que pode ser descrito por modelos de regressão não linear. Neste estudo, foram utilizados os modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Richards, devido à possibilidade de interpretação prática de seus parâmetros. O valor do parâmetro assintótico representa o máximo diário de energia disponível, enquanto a abscissa do ponto de inflexão indica o momento do dia em que o fluxo de irradiação atinge seu valor máximo. A pesquisa analisou o comportamento da irradiação solar ao nível do solo em dezessete cidades localizadas nos biomas Mata Atlântica, Amazônia, Caatinga, Cerrado e Pampa, descrevendo aspectos significativos do comportamento dessa energia em diferentes cenários. O trabalho possui potencial extensionista, com impacto direto na sociedade ao promover a conscientização sobre a produção de energia limpa, as mudanças climáticas e práticas sustentáveis. Ao estudar a disponibilidade energética durante os solstícios e equinócios, a pesquisa viabiliza práticas agrárias sustentáveis e o uso racional da energia solar, contribuindo para a redução do consumo de combustíveis fósseis. O trabalho está alinhado às áreas temáticas de meio ambiente, tecnologia e produção, e em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, como Fome Zero e Agricultura Sustentável, Energia Limpa e Acessível, e Ação Contra a Mudança Global do Clima. Esta pesquisa contribui para o uso da energia solar, na secagem de grãos, no controle da umidade do solo promovendo uma gestão agrícola eficiente. A disponibilidade diária dessa energia permite a produção limpa e sustentável de energia elétrica, minimizando o consumo de fontes não renováveis.

## IMPACT INDICATORS

The global solar radiation flux varies throughout the day, and the accumulation of this energy presents a sigmoidal behavior, which can be described by nonlinear regression models. In this study, the Logistic, Gompertz, von Bertalanffy and Richards models were used, due to the possibility of practical interpretation of their parameters. The value of the asymptotic parameter represents the maximum daily energy available, while the abscissa of the inflection point indicates the time of day when the radiation flux reaches its maximum value. The research analyzed the behavior of solar radiation at ground level in seventeen cities located in the Atlantic Forest, Amazon, Caatinga, Cerrado and Pampa biomes, describing significant

aspects of the behavior of this energy in different scenarios. The work has extension potential, with a direct impact on society by promoting awareness about clean energy production, climate change and sustainable practices. By studying energy availability during the solstices and equinoxes, the research enables sustainable agricultural practices and the rational use of solar energy, contributing to the reduction of fossil fuel consumption. The work is aligned with the thematic areas of environment, technology and production, and in accordance with the UN Sustainable Development Goals (SDGs), such as Zero Hunger and Sustainable Agriculture, Clean and Affordable Energy, and Action Against Global Climate Change. This research contributes to the use of solar energy in drying grains and controlling soil moisture, promoting efficient agricultural management. The daily availability of this energy allows for the clean and sustainable production of electricity, minimizing the consumption of non-renewable sources.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Raio luminoso incidente sobre superfície de separação plana e curva.....	30
Figura 2.2 – Raio de incidência oblíquo incidindo em interface de separação plana (a) e circular (b). .....	31
Figura 2.3 – Fonte pontual de luz, energia contida no cone que atravessa a seção circular de área $A$ . .....	32
Figura 2.4 – Irradiância diária média sob diferentes condições atmosféricas. ....	33
Figura 2.5 – Representação dos meridianos terrestres. ....	34
Figura 2.6 – Fuso horário no planeta Terra, convenção internacional de mensuração do tempo a partir do Meridiano de Greenwich. ....	35
Figura 2.7 – Incidência da irradiação solar em diferentes latitudes. ....	35
Figura 2.8 – Incidência da irradiação solar e rotação terrestre. ....	36
Figura 2.9 – Declinação solar nos equinócios e nos solstícios. ....	36
Figura 2.10 – Localização na superfície da Terra de um ponto qualquer em relação à declividade, latitude e longitude, representado pela letra $E$ . ....	37
Figura 2.11 – Ângulo de incidência $i$ do raio de incidência $I_0$ em relação à normal $N$ , perpendicular ao plano $\lambda$ . ....	37
Figura 2.12 – Valor aproximado da irradiância, em $\text{kJ/m}^2$ , nos equinócios e nos solstícios, no Hemisfério Sul. ....	39
Figura 2.13 – Evolução da estrutura de oferta de energia no Brasil 1970-2030 .....	41
Figura 2.14 – Gráfico de Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte, em 2022. ....	42
Figura 2.15 – Localização das Estações Piranométricas e Actinográficas. ....	43
Figura 2.16 – Localização das Estações Heliográficas. ....	44
Figura 2.17 – Biomas brasileiros. ....	45
Figura 2.18 – Representação da curva sigmoideal do modelo Logístico com parâmetros $\alpha = 8, 9, 10$ ; $\beta = 15$ e $\kappa = 0,6; 0,55; 0,5$ , em destaque o ponto de inflexão da curva. ....	52
Figura 2.19 – Representação da curva sigmoideal do modelo Gompertz com parâmetros $\alpha = 8, 9, 10$ , $\beta = 14$ e $\kappa = 0,7$ , com destaque o ponto de inflexão da curva. ....	54
Figura 2.20 – Representação da curva sigmoideal do modelo von Bertalanffy com parâmetros $\alpha = 8, 9, 10$ , $\beta = 15$ e $\kappa = 0,8$ , com destaque o ponto de inflexão da curva. ....	57
Figura 2.21 – Curvas da família Richards com os parâmetros $\beta = 15$ e $\kappa = 0,8$ : parâmetro $\alpha = 10$ com $\delta = 3$ (verde), $\alpha = 9$ com $\delta = 2/3$ (azul) e $\alpha = 8$ com $\delta = -1$ (vermelho). ....	59
Figura 4.1 – Parâmetro $\beta$ e com intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de São Luís – MA; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono. ....	84
Figura 4.2 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração da	

irradiação global ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de São Luís – MA. ....	85
Figura 4.3 – Parâmetro $\beta$ com intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Recife – PE; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.....	87
Figura 4.4 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração da irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Recife – PE.....	88
Figura 4.5 – Parâmetro $\beta$ e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Belo Horizonte – MG. SV: Solstício de Verão, SI: Solstício de Inverno, EP: Equinócio de Primavera, EO: Equinócio de Outono.....	90
Figura 4.6 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração da irradiação global acumulada ao longo do dia nos Equinócios e nos Solstícios na cidade de Belo Horizonte - MG. ....	91
Figura 4.7 – Parâmetro $\beta$ e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Vitória – ES. SV: Solstício de Verão; SI: Solstício de Inverno; EP: Equinócio de Primavera; EO: Equinócio de Outono. ....	93
Figura 4.8 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Vitória – ES.....	94
Figura 4.9 – Parâmetro $\beta$ com intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustados aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade do Rio de Janeiro - RJ; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono. ....	96
Figura 4.10 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios na cidade do Rio de Janeiro - RJ.....	97
Figura 4.11 – Parâmetro $\beta$ estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de São Paulo - SP; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono. ....	99
Figura 4.12 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, e irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de São Paulo – SP. ....	100
Figura 4.13 – Parâmetro $\beta$ estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Gompertz ajustado ao dado de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Curitiba - PR; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono. ....	101

Figura 4.14 – Modelo Gompertz ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, e irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Curitiba – PR.....	102
Figura 4.15 – Gráfico de dispersão dos parâmetros $\beta$ estimados e longitude das cidades do Bioma Mata Atlântica. ....	103
Figura 4.16 – Parâmetros $\beta$ estimados pelo Modelo Logístico e as longitudes das cidades do Bioma Mata Atlântica. ....	104
Figura 4.17 – Gráfico de dispersão das latitudes e dos valores dos parâmetros $\alpha$ estimados (em $kJ/m^2$ ), no Equinócio de Outono (a), Solstício de Inverno (b), Equinócio de Primavera (c) e Solstício de Verão (d), nas cidades localizadas no Bioma Mata Atlântica. ....	105
Figura 4.18 – Gráfico de dispersão dos parâmetros $\kappa$ estimados e dos parâmetros $\alpha$ estimados das cidades localizadas do Bioma Mata Atlântica, entre as latitudes $-23,72^{\circ}$ e $-19,91^{\circ}$ .....	108
Figura 4.19 – Parâmetro $\beta$ e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Macapá – AP. SV: Solstício de Verão, SI: Solstício de Inverno, EP: Equinócio de Primavera, EO: Equinócio de Outono.....	110
Figura 4.20 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Macapá – AP.....	111
Figura 4.21 – Parâmetro $\beta$ estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Manaus – AM, em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono. ....	113
Figura 4.22 – Modelo Gompertz ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Manaus – AM.....	114
Figura 4.23 – Parâmetro $\beta$ estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Humaitá – AM; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono. ....	116
Figura 4.24 – Modelo Gompertz ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Humaitá – AM. ....	117
Figura 4.25 – Estimativa do parâmetro $\beta$ e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Rio Branco – AC; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono. ....	119
Figura 4.26 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração,	

irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Rio Branco – AC.....	120
Figura 4.27 – Estimativa do parâmetro $\beta$ e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Brasília – DF; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono. ....	122
Figura 4.28 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Brasília – DF. ....	123
Figura 4.29 – Parâmetro $\beta$ estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Campo Grande – MS; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.....	125
Figura 4.30 – Modelo Logístico ajustado com o respectivo intervalo de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Campo Grande – MS.....	126
Figura 4.31 – Parâmetro $\beta$ estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Mossoró – RN; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono. ....	128
Figura 4.32 – Modelo Logístico ajustado com o respectivo intervalo de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Mossoró – RN. ....	129
Figura 4.33 – Parâmetro $\beta$ estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Petrolina – PE; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono. ....	131
Figura 4.34 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Petrolina – PE.....	132
Figura 4.35 – Parâmetro $\beta$ estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Santa Maria – RS. SV: Solstício de Verão; SI: Solstício de Inverno; EP: Equinócio de Primavera; EO: Equinócio de Outono. ....	134
Figura 4.36 – Modelo Logístico ajustado com o respectivo intervalo de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Santa Maria – RS. ....	135
Figura 4.37 – Parâmetro $\beta$ estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Santa Vitória do Palmar – RS. ....	137

Figura 4.38 – Modelo Gompertz ajustado com o respectivo intervalo de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Santa Vitória do Palmar – RS. ....	138
Figura 4.39 – Gráfico de dispersão das latitudes e dos parâmetros $\alpha$ , em $k/m^2$ , Equinócio de Outono (a), Solstício de Inverno (b), Equinócio de Primavera (c) e Solstício de Verão (d). ....	140
Figura 4.40 – Precipitação pluviométrica acumulada mensal média no período 1931 a 2020, nos meses de março, junho, setembro e dezembro. ....	142
Figura 4.41 – Média horária da temperatura do ponto de orvalho equinócio de outono no período 2018-2022. ....	143
Figura 4.42 – Média horária da temperatura do ponto de orvalho solstício de inverno no período 2018-2022. ....	144
Figura 4.43 – Média horária da temperatura do ponto de orvalho equinócio de primavera no período 2018-2022. ....	144
Figura 4.44 – Média horária da temperatura do ponto de orvalho solstício de verão no período 2018-2022.....	145
Figura 4.45 – Média horária da umidade atmosférica (em %) equinócio de outono no período 2018-2022.....	146
Figura 4.46 – Média horária da umidade (em %) solstício de inverno no período 2018-2022.....	146
Figura 4.47 – Média horária da umidade (em %) equinócio de primavera no período 2018-2022.....	147
Figura 4.48 – Média horária da umidade (em %) solstício de verão no período 2018-2022. ....	147
Figura 4.49 – Média horária da diferença entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho, em $^{\circ}C$ , no Equinócio de Outono no período 2018-2022.....	148
Figura 4.50 – Média horária da diferença entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho, em $^{\circ}C$ , no Solstício de Inverno no período 2018-2022.....	149
Figura 4.51 – Média horária da diferença entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho, em $^{\circ}C$ , no Equinócio de Primavera no período 2018-2022.....	149
Figura 4.52 – Média horária da diferença entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho, em $^{\circ}C$ , no Solstício de Verão no período 2018-2022.....	150
Figura 4.53 – Gráfico de dispersão das abscissas dos pontos de inflexão e das longitudes... ..	151
Figura 4.54 – Gráfico de dispersão das abscissas dos pontos de inflexão e das longitudes, estratificado por tipo de modelo: Modelo Logístico (a) e Modelo Gompertz (b). ..	152
Quadro 4.1 – Grandezas, Unidades no Sistema Internacional e Unidades Dimensionais. ....	62

## LISTA DE TABELA

Tabela 2.1 – Data e hora (UTC) dos equinócios e dos solstícios no Hemisfério Sul, de 2018 a 2022.....	38
Tabela 2.2 – Energia renovável na matriz energética brasileira e mundial, em 1966 e 2021. .	40
Tabela 3.1 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A001, da cidade de Brasília – DF, de 2018 a 2022.....	69
Tabela 3.2 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A702, da cidade de Campo Grande – MS, de 2018 a 2022. ....	70
Tabela 3.3 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A102, da cidade de Rio Branco – AC, de 2018 a 2022.....	70
Tabela 3.4 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A112, da cidade de Humaitá – AM, de 2018 a 2022. ....	71
Tabela 3.5 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A101, da cidade de Manaus – AM, de 2018 a 2022. ....	71
Tabela 3.6 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A249, da cidade de Macapá – AP, de 2018 a 2022.....	71
Tabela 3.7 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A203, da cidade de São Luis – MA, de 2018 a 2022.....	72
Tabela 3.8 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A307, da cidade de Petrolina – PE, de 2018 a 2022. ....	72
Tabela 3.9 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A301, da cidade de Recife – PE, de 2018 a 2022. ....	73
Tabela 3.10 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A318, da cidade de Mossoró – RN, de 2018 a 2022.....	73
Tabela 3.11 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A807, da cidade de Curitiba – PR, de 2018 a 2022.....	74
Tabela 3.12 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A803, da cidade de Santa Maria – RS, de 2018 a 2022.....	74
Tabela 3.13 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A899, da cidade de Santa Vitória do Palmar – RS, de 2018 a 2022.....	75
Tabela 3.14 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A612, da cidade de Vitória – ES, de 2018 a 2022. ....	75
Tabela 3.15 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A521, da cidade de Belo Horizonte – MG, de 2018 a 2022. ....	76
Tabela 3.16 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A602, da cidade de Rio de Janeiro – RJ, de 2018 a 2022.....	76
Tabela 3.17 – Média horária acumulada da irradiação global, em $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A701, da cidade de São Paulo – SP, de 2018 a 2022.....	77
Tabela 4.1 – Ajuste dos modelos aos dados de irradiação solar global acumulada ao longo do dia da cidade de São Luís – MA. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW). ....	81

Tabela 4.2 – Seleção dos modelos para a cidade de São Luís – MA, desvio padrão residual (DPR), coeficiente de determinação $R^2$ , Critérios de Informação de Akaike $AIC$ .	81
Tabela 4.3 – Irradiação solar acumulada máxima e parâmetros estimados $\alpha$ (em $\text{kJ/m}^2$ ) do ajuste dos modelos Logístico e Gompertz aos dados da cidade de São Luís – MA, com 95% de confiança.	82
Tabela 4.4 – Estimativas do parâmetro $\beta$ (em UTC) do ajuste dos modelos Logístico e Gompertz aos dados da cidade de São Luís – MA, com 95% de confiança.	82
Tabela 4.5 – Parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de São Luís – MA, intervalos de confiança de 95%.	83
Tabela 4.6 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade Recife – PE, com intervalos de confiança de 95%.	86
Tabela 4.7 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Belo Horizonte – MG, com intervalos de confiança de 95%.	89
Tabela 4.8 – Estimativas dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Vitória – ES, intervalos de confiança de 95%.	92
Tabela 4.9 – Parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade do Rio Janeiro – RJ, com intervalos de confiança de 95%.	95
Tabela 4.10 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores, do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de São Paulo – SP, intervalos de confiança de 95%.	98
Tabela 4.11 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Gompertz ajustados aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Curitiba – PR, intervalos de confiança de 95%.	101
Tabela 4.12 – Parâmetros da regressão linear do parâmetro $\beta$ (em UTC) e da longitude (em graus) para o Modelo Logístico, com intervalos de confiança de 95%.	104
Tabela 4.13 – Parâmetros da regressão linear dos parâmetros $\alpha$ estimados (em $\text{kJ/m}^2$ ) e as latitudes (em graus) no Equinócio de Outono, com intervalos de confiança de 95%.	106
Tabela 4.14 – Parâmetros da regressão linear dos parâmetros $\alpha$ estimados (em $\text{kJ/m}^2$ ) e as latitudes (em graus) no Solstício de Inverno, com intervalos de confiança de 95%.	106
Tabela 4.15 – Parâmetros da regressão linear dos parâmetros $\alpha$ estimados (em $\text{kJ/m}^2$ ) e as latitudes (em graus) no Equinócio de Primavera, com intervalos de confiança de 95%.	106

Tabela 4.16 – Parâmetros da regressão linear dos parâmetros $\alpha$ estimados (em $k/m^2$ ) e as latitudes (em graus) no Solstício de Verão, com intervalos de confiança de 95%.	107
Tabela 4.17 – Parâmetros da regressão linear do parâmetro $\kappa$ e do parâmetro $\alpha$ , para Modelo Logístico, em cidades localizadas do Bioma Mata Atlântica entre as latitudes -23,72 <sup>o</sup> e -19,91 <sup>o</sup> , com intervalos de confiança de 95%.	108
Tabela 4.18 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Macapá – AP, com intervalos de confiança de 95%.	109
Tabela 4.19 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Manaus – AM, com intervalos de confiança de 95%.	113
Tabela 4.20 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Humaitá – AM, intervalos de confiança de 95%.	116
Tabela 4.21 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Rio Branco – AC, intervalos de confiança de 95%.	119
Tabela 4.22 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Brasília – DF, com intervalos de confiança de 95%.	122
Tabela 4.23 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Campo Grande – MS, com intervalos de confiança de 95%.	124
Tabela 4.24 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Mossoró – RN, com intervalos de confiança de 95%.	128
Tabela 4.25 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Petrolina – PE, com intervalos de confiança de 95%.	130
Tabela 4.26 – Estimativa dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Santa Maria – RS, intervalos de confiança de 95%.	134
Tabela 4.27 – Estimativas dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $\kappa$ com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Santa Vitória do Palmar – RS, com intervalos de confiança de 95%.	136

Tabela 4.28 – Parâmetros da regressão linear dos valores assintóticos $\alpha SI$ do Solstício de Inverno e latitudes $lat$ , com intervalos de confiança de 95%.....	140
Tabela 4.29 – Parâmetros da regressão linear dos valores assintóticos $\alpha EP$ do Equinócio de Primavera e latitudes $lat$ , com intervalos de confiança de 95%.....	141
Tabela 4.30 – Parâmetros da regressão linear da abscissa do ponto de inflexão, parâmetro $\beta$ (em UTC) e da longitude (em grau), com intervalos de confiança de 95%.....	151
Tabela 4.31 – Parâmetros da regressão linear da abscissa do ponto de inflexão (em UTC) e da longitude (em graus), Modelo Logístico, com intervalos de confiança de 95%.	152
Tabela 4.32 – Parâmetros da regressão linear da abscissa do ponto de inflexão (em UTC) e da longitude (em graus), Modelo Gompertz, com intervalos de confiança de 95%.	153

## LISTA DE SIGLAS

AIC	Critério de informação de Akaike
BEN	Balanco Energético Nacional
BIC	Critério de Informação Bayesiano
BP	Teste Breush-Pagan
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIMO	Commission for Instruments and Methods of Observation
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
DPR	Desvio padrão residual
DW	Teste Durbin-Watson
EO	Equinócio de outono
EP	Equinócio de primavera
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LI	Limite inferior
LS	Limite superior
MMQ	Método de mínimos quadrados
MNL	Modelos não lineares
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ON	Observatório Nacional
QMR	Quadrado médio residual
SI	Sistema Internacional
SI	Solstício de inverno
SQR	Soma de quadrado dos erros
SQT	Soma de quadrados total
SV	Solstício de verão
SW	Teste Shapiro-Wilk
TEP	Tonelada equivalente de petróleo
TSI	Total Solar Irradiance
UA	Unidade Astronômica
UTC	Tempo Universal Coordenado
WMO	World Meteorological Organization

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>A luz: evolução das teorias.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Óptica geométrica: reflexão e refração .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3</b>	<b>Irradiância solar .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4</b>	<b>Atmosfera terrestre .....</b>	<b>32</b>
<b>2.5</b>	<b>Tempo Universal Coordenado.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6</b>	<b>Os raios colimados em relação com à geometria da superfície e à órbita da Terra .....</b>	<b>35</b>
<b>2.7</b>	<b>Irradiância nos solstícios e equinócios .....</b>	<b>38</b>
<b>2.8</b>	<b>Matriz energética.....</b>	<b>39</b>
<b>2.9</b>	<b>Estações meteorológicas .....</b>	<b>42</b>
<b>2.10</b>	<b>Biomassas brasileiros.....</b>	<b>44</b>
<b>2.11</b>	<b>Modelos de regressão .....</b>	<b>47</b>
<b>2.11.1</b>	<b>Fundamentos Matemáticos .....</b>	<b>47</b>
<b>2.11.2</b>	<b>Modelos lineares .....</b>	<b>49</b>
<b>2.11.3</b>	<b>Modelos não lineares .....</b>	<b>49</b>
<b>2.11.4</b>	<b>Modelos linearizáveis .....</b>	<b>49</b>
<b>2.11.5</b>	<b>Modelos não lineares de crescimento ou acúmulo.....</b>	<b>50</b>
<b>2.11.6</b>	<b>Análise dimensional de parâmetros .....</b>	<b>61</b>
<b>2.11.7</b>	<b>Estimação dos parâmetros em modelos não lineares .....</b>	<b>62</b>
<b>2.11.8</b>	<b>Métodos iterativos .....</b>	<b>64</b>
<b>2.11.9</b>	<b>Análise de resíduos .....</b>	<b>65</b>
<b>2.11.10</b>	<b>Crítérios para seleção de modelos.....</b>	<b>66</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>68</b>
<b>3.1</b>	<b>Natureza da pesquisa .....</b>	<b>68</b>
<b>3.2</b>	<b>Obtenção dos dados.....</b>	<b>68</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Localização das estações meteorológicas.....</b>	<b>68</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Dados das cidades da região Centro Oeste.....</b>	<b>69</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Dados das cidades da região Norte .....</b>	<b>70</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Dados das cidades da região Nordeste.....</b>	<b>72</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Dados das cidades da região Sul.....</b>	<b>73</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Dados das cidades da região Sudeste .....</b>	<b>75</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem .....</b>	<b>77</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Modelos a serem ajustados .....</b>	<b>77</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Método iterativo.....</b>	<b>77</b>

3.3.3	Análise de resíduo.....	78
3.3.4	Intervalo de confiança para os parâmetros.....	78
3.3.5	Comparação e seleção de modelos .....	79
3.2.6	Recursos computacionais .....	79
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>80</b>
4.1	São Luís - MA .....	80
4.2	Bioma Mata Atlântica .....	85
4.2.1	Recife – PE .....	85
4.2.2	Belo Horizonte – MG.....	88
4.2.3	Vitória – ES .....	91
4.2.4	Rio de Janeiro .....	94
4.2.5	São Paulo - SP .....	97
4.2.6	Curitiba - PR.....	100
4.2.7	Associação entre os parâmetros $\beta$ estimados e as longitudes das cidades no Bioma Mata Atlântica .....	103
4.2.8	Associação entre os parâmetros $\alpha$ estimados e as latitudes das cidades no Bioma Mata Atlântica .....	104
4.2.9	Associação entre os parâmetros estimados $\kappa$ e $\alpha$ estimados, pelo Modelo Logístico ajustado aos dados das cidades localizadas no Bioma Mata Atlântica.....	107
4.2.10	Considerações sobre os ajustes no Bioma Mata Atlântica.....	108
4.3	Cidades do Bioma Amazônia.....	109
4.3.1	Macapá - AP.....	109
4.3.2	Manaus – AM.....	111
4.3.3	Humaitá - AM .....	115
4.3.4	Rio Branco – AC .....	118
4.3.5	Considerações sobre os ajustes no Bioma Amazônia .....	120
4.4	Cidades do Bioma Cerrado.....	121
4.4.1	Brasília – DF .....	121
4.4.2	Campo Grande – MS.....	123
4.4.3	Considerações sobre os ajustes no Bioma Cerrado .....	126
4.5	Cidades do Bioma Caatinga .....	126
4.5.1	Mossoró – RN.....	127
4.5.2	Petrolina - PE .....	129
4.4.3	Considerações sobre os ajustes no Bioma Caatinga.....	132
4.5	Cidades do Bioma Pampa .....	132
4.5.1	Santa Maria - RS .....	133
4.5.2	Santa Vitória do Palmar - RS.....	135
4.5.3	Considerações sobre o Bioma Pampa .....	138

<b>4.6</b>	<b>Os parâmetros.....</b>	<b>138</b>
<b>4.6.1</b>	<b>Valor assintótico .....</b>	<b>139</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Valor assintótico e latitude.....</b>	<b>139</b>
<b>4.6.3</b>	<b>Possíveis fontes de perturbação dos valores assintóticos .....</b>	<b>141</b>
<b>4.6.4</b>	<b>Abscissa do ponto de inflexão e longitude .....</b>	<b>150</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>154</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>155</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>156</b>
	<b>APÊNDICE A – Dados de irradiação global .....</b>	<b>167</b>
	<b>APÊNDICE B – Ajuste dos modelos aos dados e seleção dos modelos.....</b>	<b>184</b>
	<b>APÊNDICE C – Script.....</b>	<b>203</b>
	<b>APÊNDICE D – Conversão de energia .....</b>	<b>205</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a conservação ambiental, o aumento populacional e a evolução das operações nos setores de serviços e indústrias têm direcionado a demanda para fontes de energia renovável em larga escala. O desafio atual é disponibilizar energia em quantidade suficiente e com a qualidade necessária.

Segundo a Agência Internacional de Energia, em 2021, a matriz energética mundial tinha a seguinte configuração: carvão (27,2%), petróleo e derivados (29,5%), gás natural (23,6%), hidráulica (2,5%), usinas nucleares (5%), biomassa (9,5%) e outras fontes (2,7%). No Brasil, a matriz energética em 2022 era composta por petróleo e derivados (37,5%), derivados da cana (15,4%), hidráulica (12,5%), gás natural (10,5%), lenha e carvão vegetal (9,0%), eólica e solar (3,5%), outras energias renováveis (7,0%), carvão mineral (4,6%), nuclear (1,3%) e outras energias não renováveis (0,6%). A matriz energética brasileira conta com 47,4% de fontes renováveis, e 84,8% da geração de energia elétrica provém de fontes renováveis; contudo, apenas 4,4% (29,8 TWh) do suprimento vêm da energia solar (EPE, 2023).

No início do século XXI, a energia solar fotovoltaica no Brasil era empregada apenas em sistemas isolados ou autônomos, instalados em locais não atendidos pela rede elétrica, como propriedades rurais, comunidades isoladas, centrais remotas de telecomunicação e sistemas de sinalização. A aprovação do uso de sistemas de geração integrados à rede de distribuição nacional permitiu a conexão de um maior número de sistemas fotovoltaicos. O Brasil é privilegiado com elevadas taxas de irradiação solar em todas as regiões, em comparação a países que já consolidaram sua participação no mercado de energia solar (MAUAD; FERREIRA; TRINDADE, 2017).

O fluxo de energia solar que atinge a atmosfera é constante, porém a quantidade de energia que atinge o solo sofre atenuações devido à rotação e translação do planeta, à inclinação do eixo terrestre, e a alterações climáticas e atmosféricas. A forma aproximadamente esférica da Terra determina diferentes ângulos de incidência dos raios solares em diferentes latitudes. Na faixa equatorial, os raios solares são aproximadamente perpendiculares ao solo, enquanto nas regiões polares esses raios incidem de forma muito inclinada em relação ao eixo normal da superfície. Essa diferença de inclinação resulta em variações no aquecimento da superfície. A inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano de sua órbita faz com que um dos hemisférios terrestres receba mais luz solar que o

outro ao longo da órbita de translação; as situações de igual iluminação dos hemisférios ocorrem nos equinócios.

A variação da extensão iluminada está relacionada à intensidade de luz (energia) e determina as estações do ano. A inclinação do eixo de rotação, associada à forma esférica da Terra, determina, portanto, variações no aquecimento tanto ao longo do ano em uma mesma latitude quanto, no mesmo instante, entre diferentes latitudes. Dessas variações resultam as diferentes temperaturas na superfície terrestre, que são responsáveis pelas correntes atmosféricas. Essas correntes transportam vapor d'água e são determinantes para a distribuição das nuvens e da precipitação no planeta (NEGRÃO, 2008).

Os aerossóis são outra fonte de alteração da intensidade de irradiação solar. Eles podem ser partículas sólidas, medindo até 20  $\mu\text{m}$ , ou líquidas, dispersas na atmosfera. Os aerossóis são caracterizados como de origem primária ou secundária, sendo suas principais fontes os vapores orgânicos condensáveis, as emissões primárias de matéria particulada orgânica (CO, CN), a fotoquímica da fase gasosa ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ), as emissões de  $\text{NO}_x$ , o sal marinho, as emissões primárias de matéria particulada inorgânica (poeiras, cinzas volantes, etc.), e a água, sendo esta última a mais abundante (ALVES, 2005).

A água está presente na atmosfera nas formas de vapor, líquida ou sólida. Nas formas líquida ou sólida, a água provoca alterações mais significativas na propagação da luz, ocorrendo reflexão e/ou refração. A reflexão total ocorre quando o raio luminoso incide na superfície de separação entre dois meios (bolha de água e ar, ou cristal de gelo e ar) e permanece no meio de origem, mudando sua trajetória. A refração ocorre quando o raio luminoso incide na superfície de separação entre dois meios e uma parte do raio passa para o segundo meio (bolha de água ou cristal de gelo) (ROSA et al., 2013). Essas alterações na propagação da luz interferem na intensidade da radiação que atinge a superfície terrestre.

A energia solar é uma fonte de energia limpa e sustentável, empregada em processos tecnológicos de aquecimento, secagem e geração de energia. A versatilidade de uso desse recurso exige compreensão sobre como ele se distribui no tempo e no espaço. O fluxo de irradiação solar global no solo varia ao longo do dia, e o acúmulo dessa energia apresenta um comportamento sigmoide que pode ser descrito por modelos de regressão não linear. Esses modelos são relevantes devido à possibilidade de interpretação prática dos parâmetros. Neste estudo, foram utilizados os modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Richards.

Os dados de irradiação global utilizados nas regressões estão disponíveis no Histórico de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023). Esses dados referem-se à intensidade da irradiação solar global ( $\text{kJ}/\text{m}^2$ ), em intervalos de duas horas,

acumulada ao longo do dia, nos solstícios e nos equinócios. A unidade de tempo empregada foi o UTC (Tempo Universal Coordenado). Foram selecionadas cidades brasileiras localizadas nas cinco regiões e nos biomas: Amazônia (Rio Branco - AC, Manaus - AM, Humaitá - AM, Macapá - AP), Cerrado (São Luís - MA, Brasília - DF, Campo Grande - MS), Caatinga (Petrolina - PE, Mossoró - RN), Mata Atlântica (Vitória - ES, Rio de Janeiro - RJ, São Paulo - SP, Belo Horizonte - MG, Curitiba - PR, Recife - PE) e Pampa (Santa Maria - RS, Santa Vitória do Palmar - RS).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a adequação dos modelos de regressão não linear para descrever o acúmulo da irradiação solar global diária ( $\text{kJ/m}^2$ ) no solo, com base nos dados do INMET, em dezessete cidades brasileiras representativas de cinco diferentes biomas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho aborda conceitos de física, astronomia, geografia, estações meteorológicas, biomas brasileiros, modelos de regressão e análise dimensional. Na área da física, são apresentados conceitos relativos à luz, sua forma de propagação, óptica geométrica, reflexão e refração. Na astronomia, são discutidos temas como a irradiação solar e a inclinação do eixo de rotação da Terra. Em geografia, são abordados aspectos da atmosfera terrestre, Tempo Universal Coordenado, equinócios, solstícios e características das matrizes energéticas brasileira e mundial. Nos modelos de regressão, são tratados os fundamentos matemáticos, incluindo modelos lineares e não lineares, modelos de acúmulo, estimação de parâmetros e critérios de seleção de modelos.

### 2.1 A luz: evolução das teorias

Os fenômenos físicos relacionados à luz instigam a humanidade desde as antigas civilizações. Nas mitologias (século IX a.C. a século VI d.C.), destacam-se os deuses do fogo, como Hefesto na mitologia grega e Vulcano na romana (LEITE, 2001; ASSIS FILHO, 2020). O filósofo grego Aristóteles (IV a.C.) considerava a luz como uma perturbação em um meio material, proposição que é considerada o embrião da teoria ondulatória da luz. Euclides (IV a.C.), em seu livro *Óptica*, descreve o comportamento geométrico da luz, representando os olhos como vértices que emitiam cones visuais (RIVELINO, 2015). Demócrito (460-357 a.C.) refutou a ideia de Euclides do "fogo visual" e propôs que camadas finas de átomos deslocam-se dos objetos até os olhos. René Descartes e Willebrord Snell, no século XVII, estudaram de forma independente a refração e concluíram o que hoje é conhecido como Lei de Snell-Descartes, que tem como princípio o comportamento ondulatório da luz (VICENTE; SILVA, 2024).

Isaac Newton, no século XVII, baseando-se na teoria da mecânica clássica, propôs uma teoria corpuscular da luz. Ele demonstrou a decomposição da luz branca nas diversas cores do arco-íris, comparou a luz a pequenas esferas sólidas e muito rápidas, e explicou os fenômenos de polarização e interferência da luz. No século XIX, Michael Faraday conseguiu alterar a polarização da luz, demonstrando suas características eletromagnéticas, e James Clerk Maxwell provou matematicamente a existência das ondas eletromagnéticas. Ao estudar a velocidade dessas ondas, Maxwell descobriu que era a mesma velocidade da luz, concluindo que a luz era um tipo de radiação eletromagnética. No século XX, Albert Einstein mostrou

que, no efeito fotoelétrico, há energia cinética envolvida. Ele demonstrou que a luz percorre sua trajetória não como ondas mecânicas, mas como pacotes discretos de energia, ou seja, a luz é um pacote de fótons que interage com a matéria de forma corpuscular, ao mesmo tempo em que se propaga como onda, dando origem à teoria da dualidade onda-partícula da luz (ANJOS, 2019).

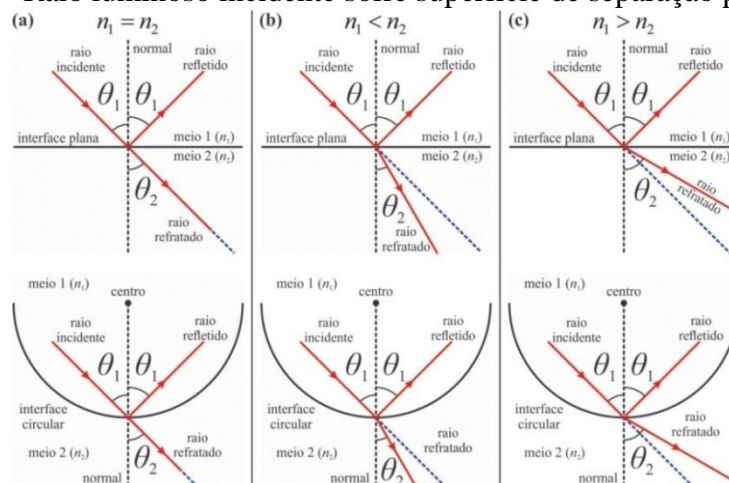
## 2.2 Óptica geométrica: reflexão e refração

A velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) é de  $2,998 \times 10^8$  m/s<sup>2</sup>, em qualquer outro meio, a velocidade da luz ( $v$ ) é sempre menor que esse valor. O índice de refração ( $n$ ) é a razão entre essas velocidades, ou seja,

$$n = \frac{c}{v}$$

esse índice pode ser denominado como índice de refração absoluto. Quando esse índice é calculado substituindo a velocidade da luz no vácuo pela velocidade da luz em outro meio, denomina-se índice de refração relativo. O valor da velocidade da luz depende do meio no qual ela está se propagando. Um raio luminoso que incide sobre a superfície de separação de dois meios distintos sofre reflexão e pode sofrer refração. A Figura 2.1 mostra a representação geométrica dos raios de incidência, refletido e refratado em superfícies planas e curvas, onde  $\theta_1$  representa a medida do ângulo de incidência e de reflexão, e  $\theta_2$  a medida do ângulo refratado, ambos medidos em relação ao eixo normal à superfície. Na Figura 2.1 (a), os meios têm o mesmo índice de refração ( $n_1 = n_2$ ), na Figura 2.1 (b), o meio 2 é mais refringente ( $n_1 < n_2$ ), na Figura 2.1 (c), o meio 1 é mais refringente ( $n_1 > n_2$ ) (MACEDO; JESUS, 2017).

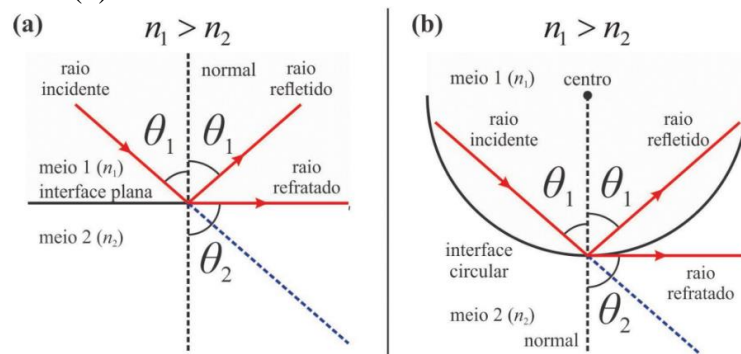
Figura 2.1 – Raio luminoso incidente sofre superfície de separação plana e curva



Fonte: Adaptado de MACEDO e JESUS (2017).

Quando o raio luminoso muda de meio e passa para um meio mais refringente, o raio refratado desloca-se em relação ao eixo normal. Quando o valor do ângulo é  $90^\circ$ , diz-se que o ângulo do raio refratado atingiu o ângulo limite. Se a superfície de contato entre os meios for plana, o raio refratado desloca-se paralelamente à superfície (Figura 2.2 (a)); se a superfície de contato for curva, o raio refratado desloca-se sobre a reta tangente à curva no ponto de incidência (Figura 2.2 (b)) (MACEDO; JESUS, 2017).

Figura 2.2 – Raio de incidência obliquo incidindo em interface de separação plana (a) e circular (b).



Fonte: Adaptado de MACEDO e JESUS (2017).

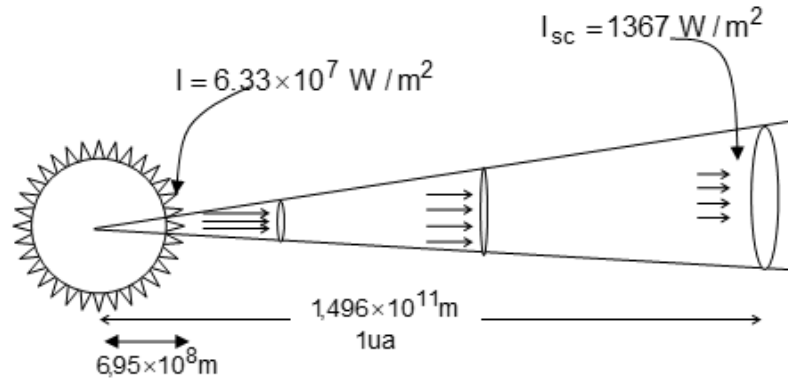
### 2.3 Irradiância solar

Radiometria e fotometria são conceitos distintos. A fotometria é o estudo da luz visível, limitada ao espectro da sensibilidade do olho humano. A radiometria, por outro lado, estuda todo o espectro eletromagnético da luz, estando relacionada ao fluxo luminoso. Considerando uma fonte pontual de luz da qual a luz se propaga radialmente, um cone sólido que atravessa uma seção circular de área  $A$  resulta em um fluxo luminoso  $\Phi$  (WEBER; HEIDEMANN; VEIT, 2020):

$$I = \frac{\Phi}{A},$$

onde,  $I$ : Iluminância ( $lux$  - lx);  $\Phi$ : Fluxo luminoso ( $lúmen$  - lm);  $A$ : Área ( $m^2$ ). O fluxo luminoso diminui a intensidade, pois é inversamente proporcional ao quadrado da distância, conforme ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Fonte pontual de luz, energia contida no cone que atravessa a seção circular de área  $A$ .



Fonte: PAIVA (2018).

A radiação solar, ou seja, o fluxo de energia transmitida sob a forma de radiação eletromagnética é a principal fonte de energia da Terra. A lei de Stefan-Boltzmann possibilita calcular a energia total irradiada por unidade de área superficial de um corpo negro na unidade de tempo:

$$P = \sigma T^4 A,$$

onde  $P$  corresponde a energia irradiada por segundo;  $\sigma$  é a constante de Stefan Boltzmann  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ;  $T$  é a temperatura em K;  $A$  é a área em  $\text{m}^2$  (GÓMEZ, et al, 2018).

A Irradiância Solar Total, denotada por TSI (*Total Solar Irradiance*) é a potência total de energia proveniente do Sol por unidade de área referente ao raio de 1 UA (Unidade Astronômica, distância média entre Sol e a Terra) calculada por:

$$P = \sigma T^4 \left( \frac{R_{\odot}}{R_1} \right)^2,$$

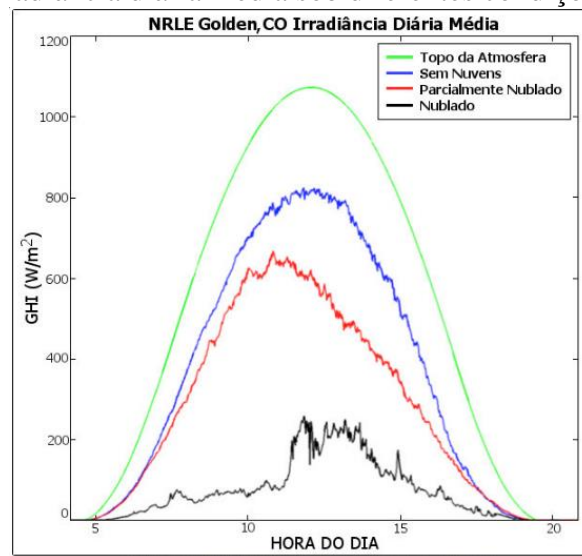
onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ,  $T$  é a temperatura aproximada da superfície do Sol 5.800K,  $R_{\odot}$  é o raio do Sol  $6,95700 \times 10^8 \text{ m}$ ,  $R_1$  é  $1 \text{ UA} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$ , valor teórico de  $P$ , a irradiância solar total (TSI), é  $1.387,6 \text{ W m}^{-2}$ , no entanto, o valor adotado em cálculos é  $1.367 \text{ W m}^{-2}$  (GÓMEZ, et al, 2018; MARTINS, et al, 2014; TAKEBAYASHI, et al, 2015).

## 2.4 Atmosfera terrestre

A atmosfera terrestre é a camada de gases e aerossóis que envolve a superfície planetária, composta principalmente por nitrogênio (78%), oxigênio (21%) e argônio (1%). O termo "aerossol", criado por Schummauss em 1920, designa suspensões relativamente estáveis

de partículas sólidas ou gotículas dispersas em um gás, com dimensões inferiores a 100  $\mu\text{m}$ . Os aerossóis naturais são misturas de materiais provenientes de diversas fontes, que são amplamente heterogêneas na composição química e nas propriedades físicas, o que dificulta sua caracterização. Contudo, os aerossóis produzidos em condições laboratoriais ou em dispositivos especiais podem ter propriedades uniformes, permitindo uma investigação relativamente fácil por métodos conhecidos. As suspensões de aerossóis são frequentemente chamadas de aerocolóides, matérias particuladas ou simplesmente partículas, que consistem em poeiras, fumos, cinzas, nevoeiros e "sprays". A concentração de aerossóis e partículas na atmosfera influencia a intensidade da irradiação solar que atinge a superfície da Terra. A intensidade da radiação é máxima acima da atmosfera, atenua-se ao entrar na atmosfera e sofre maior redução se o céu estiver parcialmente nublado ou totalmente nublado, conforme ilustrado na Figura 2.4 (ALVES, 2005).

Figura 2.4 – Irradiância diária média sob diferentes condições atmosféricas.



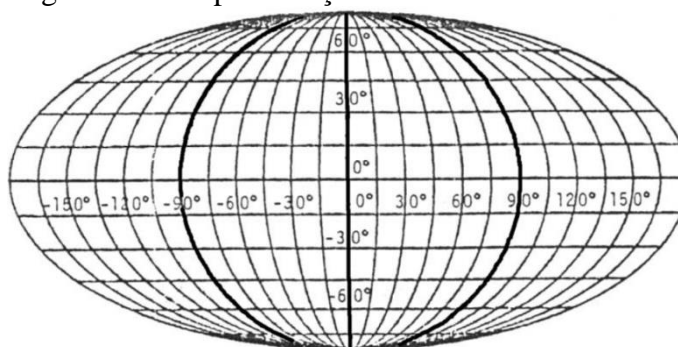
Fonte: Instituto Solar (2020).

As dispersões aéreas variam em suas propriedades físicas e químicas, dependendo da natureza das partículas suspensas, de sua concentração no gás, do tamanho e forma, e da distribuição espacial da dispersão. Os aerossóis participam de diversos fenômenos naturais, incluindo a formação de nuvens e precipitação, o balanço radiativo da atmosfera, a visibilidade, as trocas entre o oceano e a troposfera, e as possíveis alterações na camada de ozônio. As principais propriedades que caracterizam um sistema aerocoloidal são: (i) deposição gravitacional desprezível; (ii) efeitos inerciais desprezíveis; (iii) movimentos brownianos significativos; e (iv) elevada superfície específica (ALVES, 2005).

## 2.5 Tempo Universal Coordenado

O movimento de rotação da Terra determina as horas e os fusos horários, sendo possível dividir a circunferência da Terra em 360 meridianos ( $360^\circ$ ). Como o dia tem 24 horas, cada hora corresponde a 15 meridianos ( $15^\circ$ ). A partir do meridiano zero, o meridiano de Greenwich, localizado no Reino Unido, os demais meridianos são definidos em direção oeste e leste, conforme mostrado na Figura 2.5 (AGUIRRE; MELLO FILHO, 2009).

Figura 2.5 – Representação dos meridianos terrestre.



Fonte: Adaptado de AGUIRRE e MELLO FILHO (2009).

O Tempo Universal Coordenado, abreviado internacionalmente como UTC (do inglês *Coordinated Universal Time* ou do francês *Temps Universel Coordonné*), é a unidade de medida do tempo. O meridiano de Greenwich, ou meridiano  $0^\circ$ , é a referência a partir da qual se determinam os fusos horários no planeta, sendo o meridiano central do fuso horário, conforme ilustrado na Figura 2.6. O fuso horário que inclui Londres estabelece a referência (UTC ou UTC+0) quando essa cidade não está no horário de verão (quando passa para a zona horária UTC+1). O sistema de tempo UTC é o padrão para a Internet, a *World Wide Web*, a aviação, as cartas de navegação, a autorização de voo e o tráfego aéreo, a fim de evitar confusões decorrentes dos diferentes fusos e horários de verão. Desde 2013, o Brasil adota quatro fusos horários, disponíveis no Observatório Nacional – ON.

Figura 2.6 – Fuso horário no planeta Terra, convenção internacional de mensuração do tempo a partir do Meridiano de Greenwich.

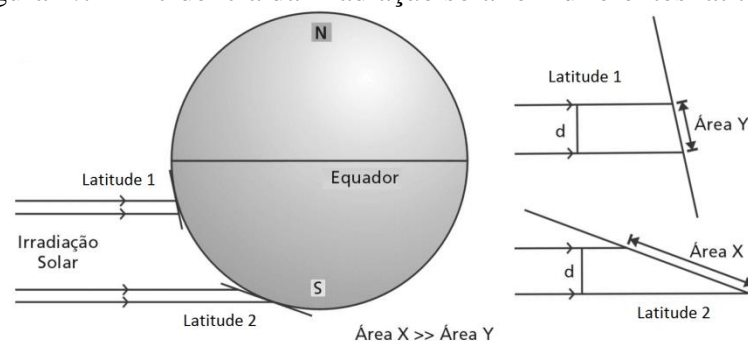


Fonte: Observatório Nacional (2022).

## 2.6 Os raios colimados em relação com à geometria da superfície e à órbita da Terra

A propagação dos raios solares é radial, ou seja, os raios luminosos seguem uma trajetória retilínea sobre uma semirreta imaginária que sai do centro geométrico do Sol e passa por um ponto de sua superfície. A distância entre o Sol e a Terra é muito grande em relação à dimensão das seções de estudo da irradiação solar, assim, neste contexto, os raios solares são considerados colimados (raios paralelos). A projeção dos raios solares na superfície da Terra sofre influência da latitude, da rotação e da órbita terrestre. Uma seção circular de diâmetro “d” de raios solares se distribui de forma distinta em diferentes latitudes. À medida que se afasta do Equador (latitude  $0^\circ$ ) em direção ao Polo Sul (latitude  $-90^\circ$ ), a área de projeção da irradiação solar aumenta (Figura 2.7), fazendo com que a distribuição de energia por unidade de área diminua.

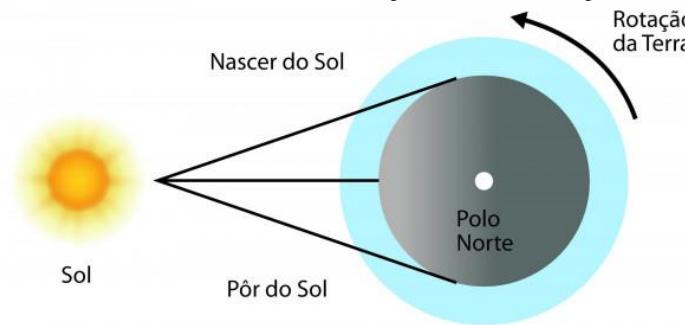
Figura 2.7 – Incidência da irradiação solar em diferentes latitudes.



Fonte: Adaptado do Canal CECIERJ (2023).

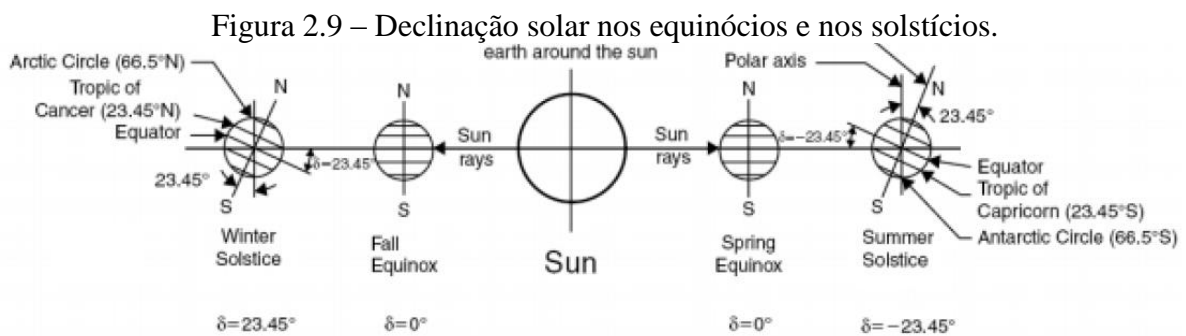
A rotação da Terra em torno de seu próprio eixo altera a intensidade da irradiação solar. Os feixes de luz que atingem o solo no nascer do Sol são aproximadamente tangentes à superfície. Já às 15:00 UTC (12:00 em Brasília, Brasil), incidem na direção do eixo de rotação, e no pôr do Sol, voltam a ser próximos à tangência (Figura 2.8).

Figura 2.8 – Incidência da irradiação solar e rotação terrestre.



Fonte: Canal CECIERJ (2023).

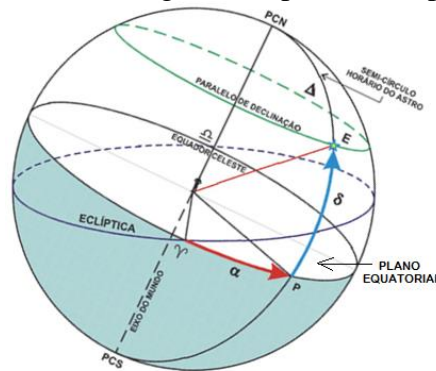
A translação da Terra em torno do Sol é outra fonte de variação da irradiação no solo, devido à declinação solar ( $\delta$ ), que é o ângulo formado pelo plano equatorial da Terra e a linha imaginária que une o centro terrestre ao centro solar. Nos equinócios, esse ângulo é  $0^\circ$ , enquanto no Hemisfério Sul, no solstício de inverno, é  $23,45^\circ$  e, no solstício de verão, é  $-23,45^\circ$ , Figura 2.9 (PAIVA, 2018; BEDAQUE; BRETONES, 2016).



Fonte: Adaptado de RAPOSO (2020).

O efeito conjunto da declividade, da latitude e da longitude em relação a um ponto  $E$  na superfície da Terra está evidenciado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Localização na superfície da Terra de um ponto qualquer em relação à declividade, latitude e longitude, representado pela letra  $E$ .

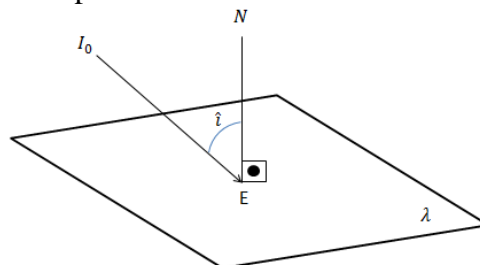


Fonte: Adaptado de BEDAQUE e BRETONES (2016).

Denota-se a superfície plana paralela a superfície da Terra por  $\lambda$ , a normal perpendicular a este plano por  $N$ , o fluxo de radiação solar que incide sobre  $\lambda$  por  $I_0$  e o ângulo de incidência do fluxo direto e a normal por  $\hat{i}$  (Figura 2.11). O fluxo de radiação solar direta perpendicular a superfície  $\lambda$ , denotado por  $I$ , expresso por:

$$I = I_0 \cos(\hat{i}).$$

Figura 2.11 – Ângulo de incidência  $\hat{i}$  do raio de incidência  $I_0$  em relação à normal  $N$ , perpendicular ao plano  $\lambda$ .



Fonte: Do autor (2023).

O cosseno do ângulo de incidência depende do ângulo  $\varphi$  da latitude, da declinação solar  $\delta$  e do ângulo horário  $\omega$  devido a rotação da Terra (negativo pela manhã e positivo a tarde) (PAIVA, 2018):

$$\cos(\hat{i}) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\varphi) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\omega).$$

O ângulo de declividade, em graus, expresso função do dia juliano, denotado por  $dn$ , é definido por:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} \left[ 360^\circ \frac{(284 + dn)}{365} \right].$$

O ângulo  $\varphi$  é a localização da latitude do ponto de incidência, assume valores  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ , positivos para o norte e negativos para o sul. O ângulo horário  $\omega$ , em grau, depende da variável  $h$ , hora do dia, é definida por:

$$\omega = (h - 12) \cdot 15^\circ, \text{ onde } 6 \leq h \leq 18.$$

## 2.7 Irradiância nos solstícios e equinócios

O termo equinócio vem do latim *aequus* (igual) e *nox* (noite), pois nesse dia os períodos diurno e noturno têm a mesma duração de 12 horas. Solstício também vem do latim, de *sol* (Sol) e *sistere* (parado), relacionado ao afélio e ao periélio. O afélio é o ponto da órbita onde um planeta está mais distante do Sol, e o periélio, o ponto mais próximo. No Hemisfério Sul o equinócio de outono ocorre em 20 ou 21 de março, o solstício de inverno ocorre em 21 ou 22 de junho, o equinócio de primavera ocorre em 22 ou 23 de setembro e solstício de verão ocorre em 21 ou 22 de dezembro (CEPEL – CRESESB, 2014), Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Data e hora (UTC) dos equinócios e dos solstícios no Hemisfério Sul, de 2018 a 2022.

Ano	Equinócio de março		Solstício de junho		Equinócio de setembro		Solstício de dezembro	
	Dia	Hora	Dia	Hora	Dia	Hora	Dia	Hora
2018	20	16:15	21	10:07	23	01:54	21	22:23
2019	20	21:58	21	15:54	23	07:50	22	04:19
2020	20	03:50	20	21:44	22	13:31	21	10:02
2021	20	09:37	21	03:32	22	19:21	21	15:59
2022	20	15:53	21	09:14	23	0:40	21	21:48

Fonte: Adaptado de ON (2023) e Wikipédia (2023).

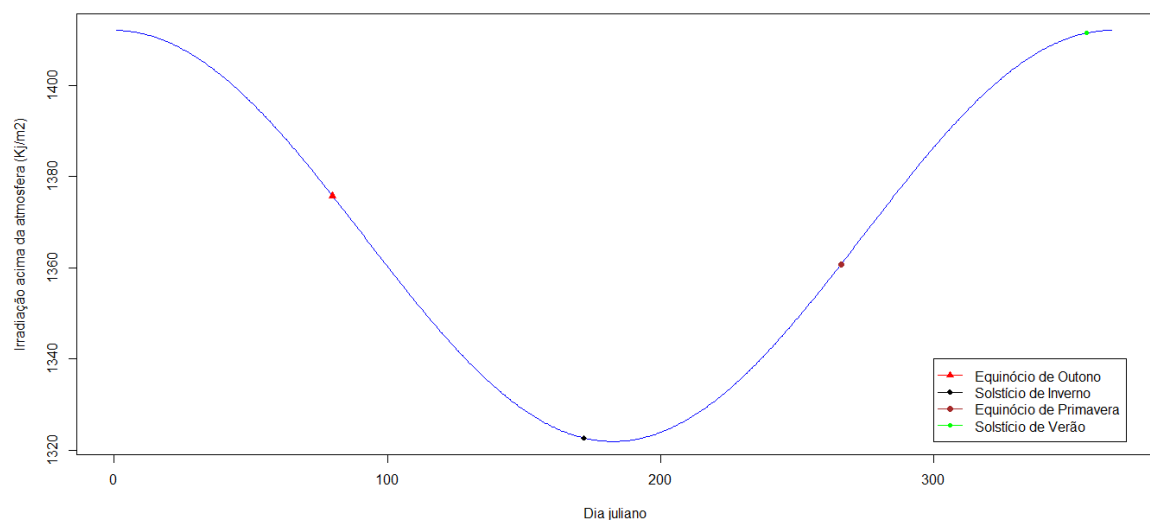
A intensidade da irradiação solar acima da atmosfera varia ao longo do ano, sendo representada pela função  $I(dn)$ , onde a variável  $dn$  corresponde ao dia juliano. Com essa função, calcula-se o valor aproximado do fluxo nos dias dos solstícios e equinócios (PAIVA, 2018; BEDAQUE; BRETONES, 2016):

$$I(dn) = 1367 \left[ 1 + 0,33 \cos \left( 360^\circ \frac{dn}{365,25} \right) \right].$$

O equinócio de outono dia 20 de março correspondente ao dia 80 no calendário juliano; o solstício de inverno dia 20 de junho corresponde ao dia 172; o equinócio de

primavera 22 de setembro corresponde ao dia 266; o solstício de verão corresponde ao dia 256. O valor aproximado da irradiação solar no equinócio de outono é  $1.375,75 \text{ kJ/m}^2$ , no solstício de inverno  $1.322,65 \text{ kJ/m}^2$ , no equinócio de primavera  $1.360,76 \text{ kJ/m}^2$ , no solstício de verão  $1.411,52 \text{ kJ/m}^2$  (Figura 2.12). A função  $I(dn)$  permite inferir que o fluxo de irradiação solar atinge o mínimo no solstício de inverno, o máximo no solstício de verão, e valores próximos à média nos equinócios.

Figura 2.12 – Valor aproximado da irradiância, em  $\text{kJ/m}^2$ , nos equinócios e nos solstícios, no Hemisfério Sul.



Fonte: Do autor (2024).

Portanto, o valor mínimo da irradiação ocorre próximo ao solstício de inverno, e o máximo, no solstício de verão, sendo os valores nos equinócios intermediários em relação aos extremos, com o de outono sendo ligeiramente maior que o de primavera.

## 2.8 Matriz energética

A predominância do uso de combustíveis fósseis foi uma característica marcante durante a segunda metade do século XX. Em 1966, a matriz energética brasileira era composta pelas seguintes fontes: petróleo (67%), hidrelétrica (26%) e carvão (7%). Nesse mesmo ano, a matriz energética mundial era constituída por petróleo (44%), hidrelétrica (5%), carvão (37%) e gás (14%). Questões ambientais, principalmente associadas ao clima, levaram à diversificação das matrizes energéticas (FGV Energia, 2022). Em 2022, a matriz energética brasileira era composta por: petróleo e derivados (37,5%), derivados da cana (15,4%),

hidráulica (12,5%), gás natural (10,5%), lenha e carvão vegetal (9,0%), eólica e solar (3,5%), outras energias renováveis (7,0%), carvão mineral (4,6%), nuclear (1,3%) e outras energias não renováveis (0,6%). A matriz energética brasileira tem 44,8% de sua composição proveniente de fontes renováveis, e 84,8% da geração de energia elétrica é de fontes renováveis. Contudo, apenas 4,4% (29,8 TWh) do suprimento vem da energia solar (EPE, 2023). No período de 1966 a 2021, houve um aumento no consumo de energia renovável, conforme mostrado na Tabela 2.2.

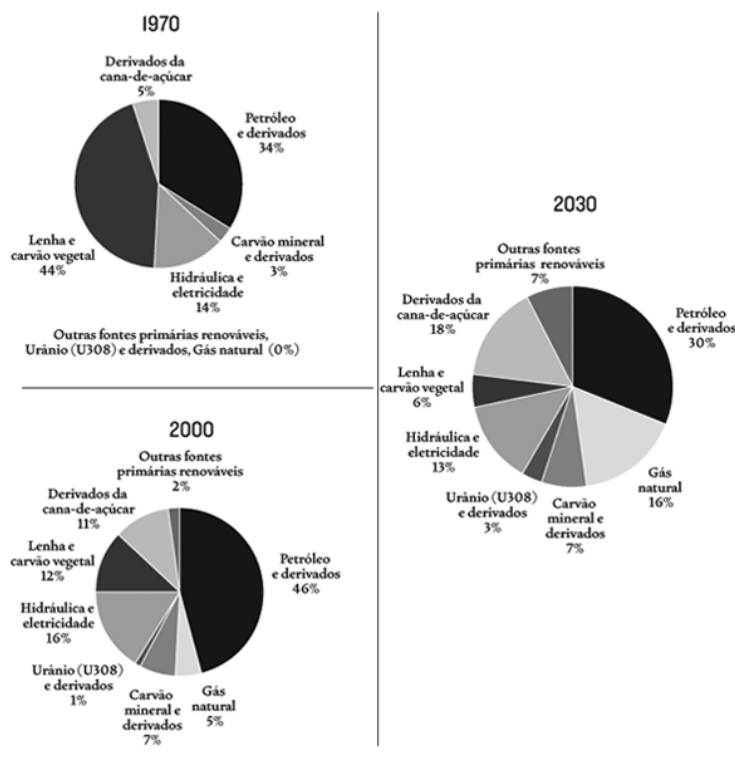
Tabela 2.2 – Energia renovável na matriz energética brasileira e mundial, em 1966 e 2021.

Matriz energética	Ano	
	1966	2022
Brasileira	26%	44,8%
Mundial	5%	14,7%

Fonte: Do autor (2023).

Em 1970, a população brasileira era de 93 milhões de habitantes, e a demanda de energia primária era inferior a 70 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep). Em 2000, a demanda foi de 190 milhões de tep, com uma população de 170 milhões de habitantes. Estima-se que o crescimento anual do consumo de energia seja de 3,0% a 4,0% até 2030, com a expectativa de que a demanda energética supere os 550 milhões de tep. No período de 1970 a 2000, houve uma diversificação da matriz energética, e para o período de 2000 a 2030, estima-se uma diminuição proporcional na oferta de petróleo e derivados, com maior participação das demais fontes energéticas, conforme mostrado na Figura 2.13 (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Figura 2.13 – Evolução da estrutura de oferta de energia no Brasil 1970-2030

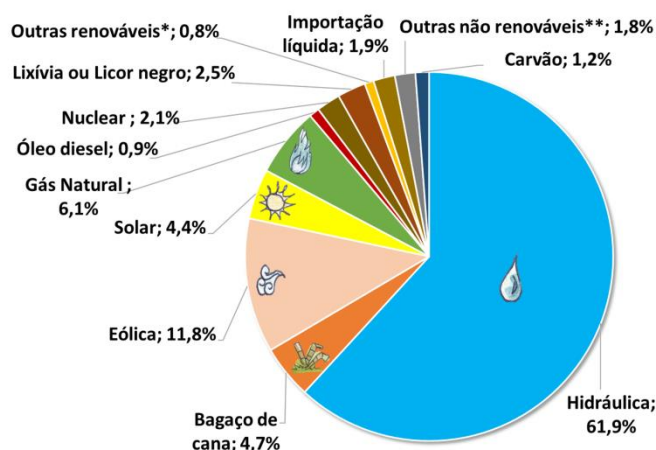


Fonte: TOLMASQUIM, GUERREIRO, GORINI (2007).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), entidade subordinada ao Ministério de Minas e Energia, em 2019, a produção de B100 (biodiesel puro) atingiu o montante de 5.923.868 m<sup>3</sup>, representando um crescimento de 10,7% em relação ao ano anterior. As principais matérias-primas foram o óleo de soja (61%) e o sebo bovino (10,3%). A fabricação de etanol atingiu um montante de 35.156 mil m<sup>3</sup>, um aumento de 5,9%. A geração de energia elétrica, tanto de serviço público quanto de autoprodutores, teve um aumento de 4,1%, totalizando 626,3 TWh (equivalente a 10<sup>12</sup> Wh) (EPE, 2020).

No Brasil, as fontes renováveis de energia correspondem a 86,1% da oferta de energia elétrica, sendo a energia hidráulica responsável por 61,9% do total. A Figura 2.14 apresenta a estrutura da oferta interna de energia elétrica por fonte produtora.

Figura 2.14 – Gráfico de Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte, em 2022.



Legenda: \* lenha, biodiesel e outras renováveis; \*\* óleo combustível, gás de coqueria e outras não renováveis.

Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2023).

## 2.9 Estações meteorológicas

O Banco de Dados Terrestre possibilitou a construção do Atlas Solarimétrico do Brasil, um banco de dados solarimétricos que seguiu as definições da World Meteorological Organization (WMO) Commission for Instruments and Methods of Observation (CIMO). Os principais instrumentos de medição solarimétrica são o heliógrafo, o actinógrafo, o piranômetro fotovoltaico e o piroheliômetro. Habitualmente, são utilizados instrumentos cujo sensor de radiação é uma termopilha, cuja principal vantagem é a resposta uniforme em relação ao comprimento de onda. Outra tecnologia disponível é o sensor baseado na expansão diferencial de um par bimetálico, provocado por uma diferença de temperatura entre duas superfícies. As fotocélulas de silício monocristalino também são amplamente utilizadas atualmente, sendo sua principal vantagem o custo, que é cerca de 10 a 20% dos instrumentos que utilizam termopilhas. No entanto, sua desvantagem é a não uniformidade de resposta espectral e a faixa estreita de comprimentos de onda (TIBA et al., 2000).

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda o estabelecimento de um sistema global, regional e nacional de centros de medição de radiação solar. A rede mundial de centros de radiação solar, seguindo a Escala Piroheliométrica Internacional de 1956, permite a comparação das observações de radiação em escala nacional e internacional (TIBA et al., 2000).

O Atlas Solarimétrico do Brasil, elaborado por Tiba et al. (2000, p. 35), utilizou dados de estações piranométricas e actinográficas (Figura 2.15), bem como de estações heliógráficas

(Figura 2.16), para a construção das Cartas de Isolinhas de radiação solar global diária, médias mensais e anuais.

Figura 2.15 – Localização das Estações Piranométricas e Actinográficas.



Fonte: Adaptado de Tiba et. al (2000).

Figura 2.16 – Localização das Estações Heliográficas.

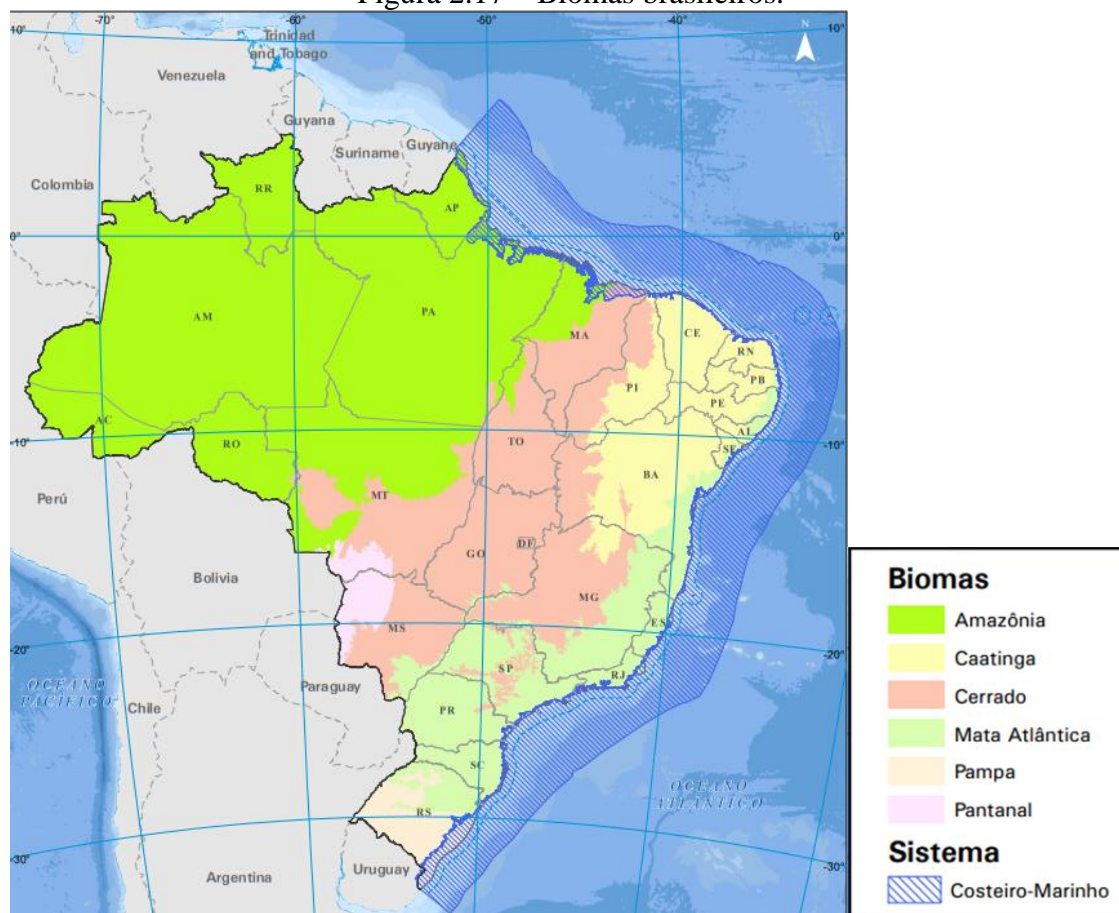


Fonte: Adaptado de Tiba et. al (2000).

## 2.10 Biomas brasileiros

O termo bioma (do grego *Bio* = vida e *Oma* = grupo ou massa) refere-se a um agrupamento de fisionomia homogênea, independente da composição florística. Um mesmo tipo de bioma pode ter floras diferentes. É importante salientar que o conceito de bioma não depende da florística da vegetação, mas apenas de sua fisionomia. A similaridade florística entre duas comunidades não implica que elas pertençam ao mesmo tipo de bioma (COUTINHO, 2006). No bioma, em relação à escala, o clima pode ser dividido em: macroclima, mesoclima e microclima. O macroclima está relacionado a fenômenos de escala global e regional. O mesoclima trata da dinâmica em escalas locais, e o microclima se refere a uma área específica. As principais variáveis que compõem o clima são: temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, radiação global e velocidade do vento (GOTARDO et al., 2019). No Brasil, há seis biomas (Figura 2.17). Este trabalho envolve cidades de cinco biomas: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pampa. A metodologia de seleção não contemplou cidades do bioma Pantanal.

Figura 2.17 – Biomas brasileiros.



Fonte: Adaptado do IBGE (2019).

A Mata Atlântica apresenta um amplo gradiente latitudinal ( $-8^{\circ}$  a  $-28^{\circ}$ ), longitudinal ( $-32^{\circ}$  a  $-58^{\circ}$ ) e altitudinal (0 a 3.000 m), a combinação destas variações climáticas, com formações geomorfológicas distintas e de tipos de solos variados propicia a formação de diferentes fitofisionomias, como a floresta ombrófila densa, floresta ombrófila mista, florestas estacionais, restingas, formações campestres, formações litorâneas e ecótonos. A Mata Atlântica atual se estende por boa parte do litoral brasileiro, atingindo o interior austral do continente, onde abrange regiões do Paraguai e Argentina (MUYLAERT et al., 2018).

O bioma amazônico ocupa uma região de grandes dimensões, com alta diversidade em termos de características geológicas, pedológicas, climáticas e de vegetação. Existem tanto solos com maior maturidade pedogenética, como os argissolos e os latossolos, que são predominantes, quanto solos geologicamente recentes, como os vertissolos e cambissolos. Os solos são bem drenados, mas apresentam grande variação nos atributos físicos, químicos e mineralógicos. As condições climáticas observadas na região, especialmente quanto ao regime térmico-hídrico, favorecem o intemperismo avançado dos solos (WADT, 2023). Segundo Oliveira (2012, p. 25), a partir do banco de dados de Sheffield (FERREIRA et. al.,

2006), obtêm-se os valores anuais médios mínimo e máximo do clima no Bioma Amazônia: precipitação de 1.125 e 3.435 mm/ano, radiação solar de 183 e 232 W/m<sup>2</sup>, temperatura de 23 e 28°C, pressão atmosférica de 93 e 101 kPa, e umidade específica de 0,015 e 0,021 kg/kg para o período de 1970 a 2001.

O Cerrado possui uma extensão de pouco mais de 2 milhões de quilômetros quadrados, sendo o segundo maior bioma brasileiro, menor apenas que a Amazônia. Estende-se entre os paralelos 2° e 24° de latitude sul e os meridianos 41° e 60° de longitude oeste. Essas dimensões continentais propiciam grande diversidade climática, com características equatoriais, tropicais e subtropicais. A variação latitudinal condiciona a diferença no ganho de radiação solar, de maneira decrescente a partir do equador. A amplitude topográfica varia desde 240 m, nas áreas próximas às regiões litorâneas, até 1.819 m, nos chapadões. A posição interiorana no continente sul-americano e a atuação de massas de ar de origem equatorial, tropical e polar, formadas em superfícies continentais e marítimas, ocasionam distintas condições atmosféricas de temperatura, precipitação e umidade. O clima tropical tem chuvas de verão, apresentando, mesmo no mês mais frio, uma temperatura média superior a 18°C. No clima subtropical, com chuvas de verão e verões quentes, a temperatura média no mês mais frio varia entre -3°C e 18°C, enquanto no mês mais quente a média é superior a 22°C (NASCIMENTO; NOVAIS, 2020).

A Caatinga é considerada o principal ecossistema existente na Região Nordeste. O regime pluvial é caracterizado por duas estações: a úmida (inverno), quando ocorrem cerca de 80% das precipitações anuais, com duração de 3 a 5 meses e precipitação de 300 a 800 mm anuais; e a estação seca (verão), que ocorre nos meses restantes do ano. A irregularidade do regime pluviométrico provoca periodicamente a ocorrência de secas prolongadas (ANDRADE; SILVA, 2013). A temperatura é megatérmica, com média anual entre 25°C e 31°C, sendo junho e julho os meses mais frios. No período das chuvas, a umidade relativa do ar flutua entre 40% e 50%; na época seca, entre 80% e 90%. A evapotranspiração potencial pode alcançar até 2.700 mm anuais. Esse processo de troca no sistema solo-planta-atmosfera tem como principal força motriz a radiação solar (ARAÚJO FILHO, 2013).

O Pampa é o único bioma brasileiro localizado inteiramente em um único estado, ocupando cerca de dois terços do Rio Grande do Sul. O relevo varia entre plano e suavemente ondulado, e o clima é subtropical úmido. O bioma apresenta verões quentes, com temperaturas que oscilam entre 22°C e mais de 24°C, nos meses de dezembro a março, e temperaturas abaixo de 0°C nos meses mais frios, entre junho e agosto. A precipitação pluvial

média anual varia entre 1.250 e 1.500 mm, sendo os menores índices pluviométricos observados durante o verão (MOREIRA; KUPLICH; FONSECA, 2011).

## 2.11 Modelos de regressão

Na busca por entender a relação entre as alturas de filhos e pais, Galton propôs a teoria da Regressão. Ele percebeu que, independentemente das estaturas dos pais (seja muito altos ou muito baixos), as alturas dos filhos tendem a convergir para a média da população, ou seja, os valores regridem para a média (DEMÉTRIO; ZOCCHI, 2011).

A regressão ajusta uma função a um conjunto de dados, utilizando uma metodologia apropriada que relaciona as variáveis regressoras aos valores da variável resposta. A expressão matemática resultante permite realizar estimativas (HOFFMANN, 2015).

Na Matemática, a relação entre as variáveis é perfeita; já na Estatística, os erros de mensuração e a ocorrência de variáveis não controladas tornam a relação entre as variáveis imperfeita, resultando na inclusão de um erro na variável resposta (DEMÉTRIO; ZOCCHI, 2011; HOFFMANN, 2015).

A análise de regressão busca identificar uma relação, denotada por  $f(\cdot)$ , entre as variáveis regressoras, denotadas por  $\mathbf{X}$ , e a variável resposta, denotada por  $Y$ , representada genericamente por  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_p)$ .

Considerando o erro aditivo, o modelo estatístico pode ser denotado por

$$Y_i = f(\mathbf{X}_i; \boldsymbol{\theta}_j) + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \text{ e } (j = 1, 2, \dots, p)$$

onde  $Y_i$  representa os valores observados, variável resposta ou variável dependente;  $X_i$  são as variáveis independentes ou predictoras;  $n$  é o número de observações;  $\boldsymbol{\theta}_j$  é o conjunto de parâmetros;  $p$  é o número de parâmetros;  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$  é o erro aleatório associado a observação  $i$ . Os erros são independentes com distribuição normal, média zero e variância  $\sigma^2$ .

### 2.11.1 Fundamentos Matemáticos

Uma função é uma regra  $f$  que associa um elemento  $x \in X$  a um único elemento  $y = f(x) \in Y$ . O gráfico de  $f$  será o conjunto dos pontos  $(x, y)$  em  $\mathbb{R}^2$ , onde  $(x, y)$  é um par ordenado definido por  $f$ , com  $x$  pertencendo ao eixo  $X$  e  $y$  ao eixo perpendicular  $Y$ .

A derivada de primeira ordem da função  $f$ , denotada por  $f'$ , permite avaliar algumas características de  $f$ . No intervalo onde  $f' > 0$  a função  $f$  é crescente no intervalo e no

intervalo onde  $f' < 0$  a função  $f$  é decrescente. Se existir um  $x$  tal que  $f'(x) = 0$ , este  $x$  é a abcissa de um ponto crítico, e, se for um ponto de máximo ou de mínimo, isso poderá ser avaliado pela derivada de segunda ordem.

A derivada de segunda ordem da função  $f$ , denotada por  $f''$ , permite avaliar outras características de  $f$ . No intervalo onde  $f'' > 0$  a função  $f$  tem concavidade voltada para cima, e no intervalo onde  $f'' < 0$  a função  $f$  tem concavidade voltada para baixo. Se existir um  $x$  tal que  $f''(x) = 0$ , este  $x$  é a abcissa de um ponto de inflexão (LEITHOOLD, 1994; THOMAS; WEIR; HASS, 2009).

Uma função cuja imagem consiste em um único número é denominada função constante, ou seja,  $f(x) = L$ , sendo  $L$  um número real qualquer. O gráfico de  $f$  será uma reta paralela ao eixo  $X$ .

Seja  $f$  uma função definida em um intervalo  $(a, +\infty)$ . O limite de  $f(x)$  quando  $x$  cresce indefinitivamente é  $L$ , assim denotado  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = L$ , se para todo  $\Delta > 0$ , não importando quão pequeno seja, existir um número  $M > 0$  tal que se  $x > M$ , então  $|f(x) - L| < \Delta$ .

Seja  $f$  uma função definida em um intervalo  $(-\infty, a)$ . O limite de  $f(x)$  quando  $x$  decresce indefinitivamente, é  $L$ , assim denotado  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = L$ , se para todo  $\Delta > 0$ , não importando quão pequeno seja, existir um número  $N < 0$  tal que se  $x < N$ , então  $|f(x) - L| < \Delta$ . Neste caso diz-se que a função  $f$  tem uma assíntota horizontal em  $L$ .

A reta  $y = L$  é uma assíntota horizontal do gráfico da função  $y = f(x)$  se pelo menos uma das seguintes afirmações for válida:

- a)  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = L$  e, para um  $N$ , se  $x > N$ , então  $f(x) \neq L$ ;
- b)  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = L$  e, para um  $N$ , se  $x < N$ , então  $f(x) \neq L$ .

Se  $a$  um número real tal que  $a > 1$  então:

- a)  $\lim_{x \rightarrow +\infty} a^x = +\infty$ ;
- b)  $\lim_{x \rightarrow -\infty} a^x = 0$ ;
- c)  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{a^x} = 0$ ;
- d)  $\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{1}{a^x} = +\infty$ .

### 2.11.2 Modelos lineares

Um modelo linear é aquele cuja derivada parcial dos parâmetros não depende de nenhum outro parâmetro, sendo caracterizado como linear nos parâmetros (DRAPER; SMITH, 1998). Alguns exemplos:

- a) modelo  $f(X, \alpha) = \alpha + \varepsilon$ , derivada  $\frac{df}{d\alpha} = 1$ ;
- b) modelo  $f(X, \alpha, \beta) = \alpha + \beta X + \varepsilon$ , derivadas  $\frac{\partial f}{\partial \alpha} = 1$  e  $\frac{\partial f}{\partial \beta} = X$ ;
- c) modelo  $f(X, \alpha, \beta, \gamma) = \alpha + \beta X + \gamma X^2 + \varepsilon$ , derivadas  $\frac{\partial f}{\partial \alpha} = 1$ ,  $\frac{\partial f}{\partial \beta} = X$  e  $\frac{\partial f}{\partial \gamma} = X^2$ .

### 2.11.3 Modelos não lineares

Um modelo não linear é aquele que pelo menos uma derivada parcial depende de pelo menos um parâmetro, sendo caracterizado como não linear nos parâmetros (DRAPER; SMITH, 1998). Alguns exemplos:

- a) modelo  $f(X, \alpha) = e^{\alpha X} + \varepsilon$ , com derivada  $\frac{df}{d\alpha} = X e^{\alpha X}$ ;
- b) modelo  $f(X, \alpha, \beta) = \alpha e^{\beta X} + \varepsilon$ , com derivadas  $\frac{\partial f}{\partial \alpha} = e^{\beta X}$  e  $\frac{\partial f}{\partial \beta} = \alpha X e^{\beta X}$ ;
- c) modelo  $f(X, \alpha, \beta, \gamma) = \alpha + \beta e^{\gamma X} + \varepsilon$ , com derivadas  $\frac{\partial f}{\partial \alpha} = 1$ ,  $\frac{\partial f}{\partial \beta} = e^{\gamma X}$  e  $\frac{\partial f}{\partial \gamma} = \beta X e^{\gamma X}$ .

### 2.11.4 Modelos linearizáveis

Um modelo linearizável é um modelo não linear que após uma transformação algébrica apropriada, torna-se linear (DRAPER; SMITH, 1998). Os exemplos de modelos não lineares do item 2.4.4 podem ser transformados em modelos linearizáveis:

- a) modelo  $f(X, \alpha) = Y = e^{\alpha X} e^{\varepsilon}$  com a transformação  $W = \ln(Y) = \alpha X + \varepsilon$ ;
- b) modelo  $f(X, \alpha, \beta) = Y = \alpha e^{\beta X} e^{\varepsilon}$  com a transformação  $W = \ln(Y) = \ln(\alpha) + \beta X + \varepsilon$ ;
- c) modelo  $f(X, \alpha, \beta, \gamma) = Y = \alpha + \beta e^{\gamma X} e^{\varepsilon}$  com a transformação  $W = Y - \alpha$  e  $V = \ln(W) = \ln(\beta) + \gamma X + \varepsilon$ .

Essas transformações devem respeitar certas restrições matemáticas e podem dificultar a interpretação prática dos parâmetros. Segundo Fernandes et. al. (2015, p. 397) os modelos não lineares mais utilizados em estudos de crescimento são Logístico, von Bertalanffy, Brody e Richards.

### 2.11.5 Modelos não lineares de crescimento ou acúmulo

Os modelos não lineares (MNL) são aplicados nas mais diversas áreas, como agronomia, agricultura, engenharia, econometria, zootecnia, farmacologia, química, ecologia, biologia, educação. O termo “curva de crescimento”, usualmente associado ao MNL, remete à imagem de curvas sigmoidais (PRUDENTE, 2009).

A vantagem do modelo de regressão não linear em relação ao modelo linear está na interpretação dos parâmetros, o que auxilia o pesquisador no processo de tomada de decisão (MAIA, 2009). Segundo Fernandes et al (2014, p. 209), os modelos não lineares Logístico e Gompertz apresentam formato sigmoidal e ponto de inflexão, no qual a taxa de crescimento passa a decrescer, ou seja, a variável resposta tem acréscimos decrescentes.

#### Modelo Logístico

O modelo Logístico foi proposto por Verhulst, em 1838, para descrever o crescimento de populações humanas (BACAËR, 2011). Este modelo apresenta melhor desempenho para descrever curvas de crescimento principalmente pela interpretação prática dos parâmetros (FERNANDES et al. 2015). O modelo é dado por:

$$Y_i = \frac{\alpha}{1+e^{\kappa(\beta-x_i)}} + \varepsilon_i \quad (2.1)$$

onde  $Y_i$  é a  $i$ -ésima observação da variável dependente;  $x_i$  é a  $i$ -ésima observação da variável independente;  $i$  é o indexador ( $i = 1, 2, \dots, n$ ); os parâmetros  $\alpha$  e  $\kappa$  são constantes reais positivas e  $\beta$  uma constante real qualquer;  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório associado a  $i$ -ésima observação. O erro aleatório pressupõe-se que seja independente e identicamente distribuído (i.i.d.), seguindo uma distribuição normal de média zero e variância constante, ou seja,  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$  (FERNANDES et al., 2014; FERNANDES et al., 2015; FREITAS, 2005; MUNIZ; NASCIMENTO; FERNANDES, 2017).

Considerando  $Y = \frac{\alpha}{1+e^{\kappa(\beta-x)}}$ , da definição (c) temos que:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [e^{\kappa(\beta-x)}] = 0$$

e da definição (d):

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} [e^{\kappa(\beta-x)}] = +\infty.$$

Assim, temos:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} Y = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[ \frac{\alpha}{1 + e^{\kappa(\beta-x)}} \right] = \frac{\alpha}{1 + \lim_{x \rightarrow +\infty} [e^{\kappa(\beta-x)}]} = \frac{\alpha}{1 + 0} = \alpha.$$

Portanto,  $\lim_{x \rightarrow +\infty} Y = \alpha$ .

E também:

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} Y = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left[ \frac{\alpha}{1 + e^{\kappa(\beta-x)}} \right] = \frac{\alpha}{1 + \lim_{x \rightarrow -\infty} [e^{\kappa(\beta-x)}]} = \frac{\alpha}{1 + \infty} = 0$$

Portanto,  $\lim_{x \rightarrow -\infty} Y = 0$ .

Das definições (a) e (b), podemos concluir que  $Y = 0$  e  $Y = \alpha$  são duas assíntotas horizontais do modelo.

A derivada de primeira ordem é:

$$\frac{dY}{dx}(x) = \frac{\alpha\kappa e^{\kappa(\beta-x)}}{[1 + e^{\kappa(\beta-x)}]^2}.$$

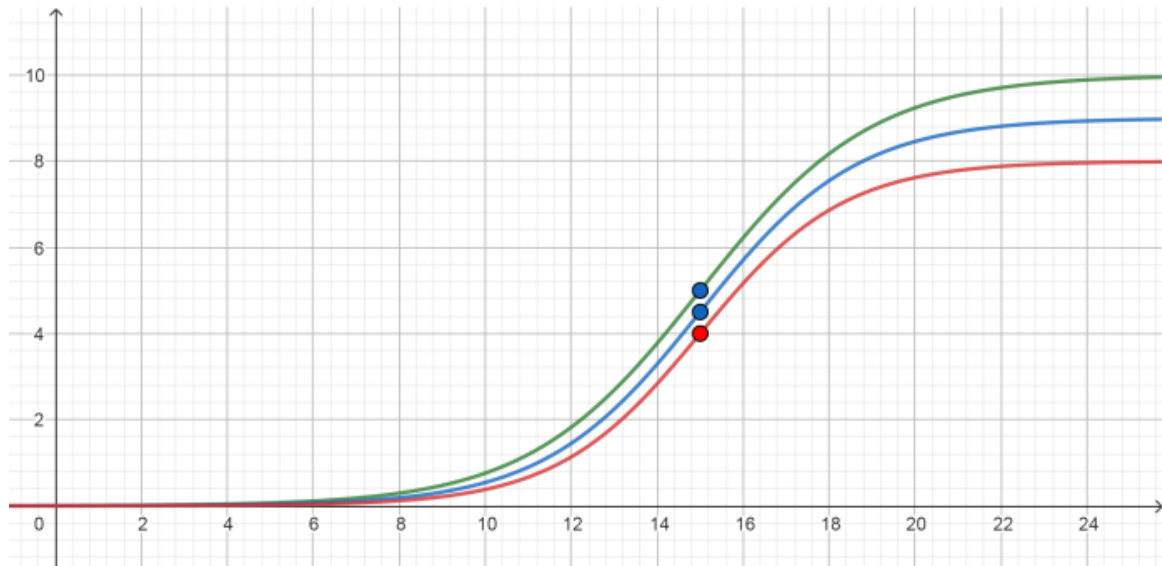
Observa-se que  $\frac{dY}{dx} > 0$ , então a função do modelo é estritamente crescente e não possui ponto crítico.

A derivada de segunda ordem é:

$$\frac{d^2Y}{dx^2}(x) = \frac{\alpha\kappa^2 e^{\kappa(\beta-x)} [e^{\kappa(\beta-x)} - 1]}{[1 + e^{\kappa(\beta-x)}]^3}$$

Observa-se que  $\frac{d^2Y}{dx^2}(x) = 0$  em  $x = \beta$ , ou seja, o modelo tem ponto de inflexão com coordenadas  $(\beta, \frac{\alpha}{2})$ . No intervalo onde  $x < \beta$  o modelo tem convexidade voltada para cima e no intervalo onde  $x > \beta$ , o modelo tem concavidade voltada para baixo. Na Figura 2.18 tem-se exemplo do modelo Logístico com parâmetros  $\beta = 15$ ,  $\alpha = 8$  com  $\kappa = 0,6$ ,  $\alpha = 9$  com  $\kappa = 0,55$  e  $\alpha = 10$  com  $\kappa = 0,5$ .

Figura 2.18 – Representação da curva sigmoidal do modelo Logístico com parâmetros  $\alpha = 8, 9, 10$ ;  $\beta = 15$  e  $\kappa = 0,6; 0,55; 0,5$ , em destaque o ponto de inflexão da curva.



Fonte: Do autor (2022)

A derivada de primeira ordem fornece a velocidade de crescimento da função, enquanto a de segunda ordem a aceleração. A derivada de terceira ordem permite identificar quando a aceleração é máxima ou mínima.

A derivada de terceira ordem é:

$$\frac{d^3Y}{dx^3}(x) = \frac{\alpha\kappa^3 e^{\kappa(\beta-x)} [e^{2\kappa(\beta-x)} - 4e^{\kappa(\beta-x)} + 1]}{[1 + e^{\kappa(\beta-x)}]^4},$$

observa-se que  $\frac{d^3Y}{dx^3}(x) = 0$  em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(2 - \sqrt{3})$  e  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(2 + \sqrt{3})$ , ou seja, são os pontos críticos da função aceleração.

A derivada de quarta ordem é:

$$\frac{d^4Y}{dx^4}(x) = \frac{\alpha\kappa^4 e^{\kappa(\beta-x)} [-4e^{3\kappa(\beta-x)} + 2e^{2\kappa(\beta-x)} + 1]}{[1 + e^{\kappa(\beta-x)}]^5}.$$

Essa derivada permite classificar os pontos críticos da função aceleração. Temos que:

$$\frac{d^4Y}{dx^4}\left(\beta + \frac{1}{\kappa} \ln(2 - \sqrt{3})\right) = -\alpha\kappa^4 \frac{171 + 113\sqrt{3}}{216}.$$

Logo,  $\frac{d^4Y}{dx^4}\left(\beta + \frac{1}{\kappa} \ln(2 - \sqrt{3})\right) < 0$ , assim a aceleração máxima ocorre em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(2 - \sqrt{3})$ . Como:

$$\frac{d^4Y}{dx^4}\left(\beta + \frac{1}{\kappa} \ln(2 + \sqrt{3})\right) = \alpha\kappa^4 \frac{-171 + 113\sqrt{3}}{216}.$$

Logo,  $\frac{d^4Y}{dx^4} \left( \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(2 + \sqrt{3}) \right) > 0$ , então a aceleração mínima ocorre em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(2 + \sqrt{3})$ .

### Modelo Gompertz

Em 1825, Gompertz propôs este modelo para estudar as tábuas de vida, e por muito tempo foi aplicado nas ciências atuárias. Em 1926, Wright utilizou este modelo como uma curva de crescimento; em 1940, Medawar o empregou para descrever o crescimento do coração de galinhas. Desde então, diversos autores têm usado esse modelo para descrever fenômenos econômicos e biológicos (SEBER; WILD, 2003; WINSOR, 1932). Embora muito similar ao modelo Logístico, o modelo Gompertz possui diferentes parametrizações. Segundo Fernandes et al (2015, p. 398), a expressão que apresenta uma interpretação prática dos parâmetros é

$$Y_i = \alpha e^{-e^{\kappa(\beta-x_i)}} + \varepsilon_i. \quad (2.2)$$

A interpretação dos parâmetros é a mesma definida anteriormente para o modelo Logístico. O modelo Gompertz apresenta curva com caráter sigmoidal; contudo, ela não é simétrica em relação ao ponto de inflexão, o que favorece muitos estudos de crescimento animal (SEBER; WILD, 2003).

Considerando  $Y = \alpha e^{-e^{\kappa(\beta-x_i)}}$ , da definição (c) temos que:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \left[ e^{-e^{\kappa(\beta-x_i)}} \right] = 0$$

e da definição (d) :

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \left[ e^{-e^{\kappa(\beta-x_i)}} \right] = +\infty.$$

Assim, temos:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} Y = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[ \alpha e^{-e^{\kappa(\beta-x_i)}} \right] = \alpha e^0 = \alpha \Rightarrow \lim_{x \rightarrow +\infty} Y = \alpha$$

e

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} Y = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left[ \alpha e^{-e^{\kappa(\beta-x_i)}} \right] = \alpha \cdot 0 = 0 \Rightarrow \lim_{x \rightarrow -\infty} Y = 0.$$

Das definições (a) e (b), podemos concluir que  $Y = 0$  e  $Y = \alpha$  são duas assíntotas horizontais do modelo ajustado.

A derivada de primeira ordem é:

$$\frac{dY}{dx} = \alpha \kappa e^{\kappa(\beta-x_i)-e^{\kappa(\beta-x_i)}}.$$

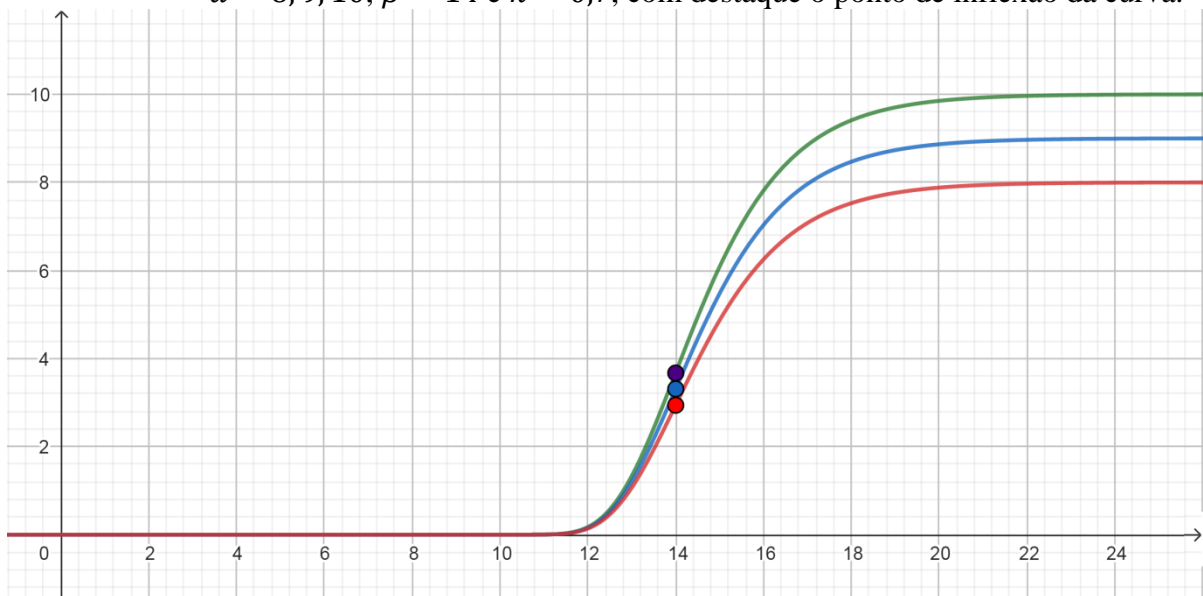
Observa-se que  $\frac{dY}{dx} > 0$ , então a função do modelo é estritamente crescente e não possui ponto crítico.

A derivada de segunda ordem é:

$$\frac{d^2Y}{dx^2} = \alpha\kappa^2 e^{\kappa(\beta-x_i)-e^{\kappa(\beta-x_i)}} [e^{\kappa(\beta-x_i)} - 1].$$

Observa-se que  $\frac{d^2Y}{dx^2} = 0$  em  $x = \beta$ , ou seja, o modelo tem ponto de inflexão com coordenadas  $(\beta, \frac{\alpha}{e})$ . No intervalo onde  $x < \beta$ , o modelo tem concavidade voltada para cima, e no intervalo onde  $x > \beta$  o modelo tem concavidade voltada para baixo. Na Figura 2.19, temos um exemplo do modelo Gompertz com parâmetros  $\beta = 14$ ,  $\kappa = 0,7$  e  $\alpha = 8, 9, 10$ .

Figura 2.19 – Representação da curva sigmoidal do modelo Gompertz com parâmetros  $\alpha = 8, 9, 10$ ,  $\beta = 14$  e  $\kappa = 0,7$ , com destaque o ponto de inflexão da curva.



Fonte: Do autor (2022).

No Modelo Gompertz, as derivadas têm o mesmo significado que no modelo Logístico. A derivada de terceira ordem é:

$$\frac{d^3Y}{dx^3}(x) = \alpha\kappa^3 e^{\kappa(\beta-x_i)-e^{\kappa(\beta-x_i)}} [e^{2\kappa(\beta-x_i)} - 3e^{\kappa(\beta-x_i)} + 1].$$

Observa-se que  $\frac{d^3Y}{dx^3}(x) = 0$  em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{3-\sqrt{5}}{2}\right)$  e  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{3+\sqrt{5}}{2}\right)$ , ou seja, esses são os pontos críticos da função aceleração.

A derivada de quarta ordem é:

$$\frac{d^4Y}{dx^4}(x) = \alpha\kappa^3 e^{\kappa(\beta-x_i)-e^{\kappa(\beta-x_i)}} [e^{3\kappa(\beta-x_i)} - 6e^{2\kappa(\beta-x_i)} + 7e^{\kappa(\beta-x_i)} - 1].$$

Essa derivada permite classificar os pontos críticos da função aceleração. Temos que;

$$\frac{d^4Y}{dx^4} \left( \beta + \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \right) \right) = -\alpha \kappa^4 e^{-\frac{3+\sqrt{5}}{2}} \frac{15 + 7\sqrt{5}}{2}.$$

Logo,  $\frac{d^4Y}{dx^4} \left( \beta + \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \right) \right) < 0$ , assim a aceleração máxima ocorre em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \right)$ . Como:

$$\frac{d^4Y}{dx^4} \left( \beta + \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{3 + \sqrt{5}}{2} \right) \right) = \alpha \kappa^4 e^{-\frac{3+\sqrt{5}}{2}} \frac{7\sqrt{5} - 15}{2}.$$

Logo,  $\frac{d^4Y}{dx^4} \left( \beta + \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{3 + \sqrt{5}}{2} \right) \right) > 0$ , então a aceleração mínima ocorre em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{3 + \sqrt{5}}{2} \right)$ .

### Modelo von Bertalanffy

Von Bertalanffy propôs o modelo em 1957, que se mostrou muito apropriado para descrever curvas de crescimento populacional de peixes e crustáceos (BERTALANFFY, 1957; SEBER; WILD, 2003). Richards foi pioneiro na aplicação deste modelo nas Ciências Florestais, ao explicitar uma modelagem adequada do crescimento vegetal em virtude do formato não simétrico de sua curva (BRITO et al. 2007). O modelo pode ser representado por:

$$Y_i = \alpha \left[ 1 - \frac{e^{\kappa(\beta - x_i)}}{3} \right]^3 + \varepsilon_i. \quad (2.3)$$

Os parâmetros  $\alpha$ ,  $\kappa$  e  $\beta$  são constantes reais positivas e têm a mesma interpretação prática que no modelo Logístico (LIMA et al., 2017).

Seja  $Y = \alpha \left[ 1 - \frac{e^{\kappa(\beta - x_i)}}{3} \right]^3$ , o modelo ajustado aos dados, da definição (c) temos que:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [e^{\kappa(\beta - x_i)}] = 0$$

e da definição (d):

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} [e^{\kappa(\beta - x_i)}] = +\infty.$$

Então:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} Y = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left\{ \alpha \left[ 1 - \frac{e^{\kappa(\beta - x_i)}}{3} \right]^3 \right\} = \alpha \left[ 1 - \frac{0}{3} \right]^3 = \alpha,$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} Y = \alpha$$

e

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} Y = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left\{ \alpha \left[ 1 - \frac{e^{\kappa(\beta-x_i)}}{3} \right]^3 \right\} = \alpha [1 - (+\infty)]^3 = -\infty,$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} Y = -\infty.$$

Portanto, da definição (a), podemos concluir que  $Y = \alpha$  é a assíntota horizontal do modelo ajustado.

A derivada de primeira ordem é:

$$\frac{dY}{dx} = \alpha \kappa e^{\kappa(\beta-x_i)} \left[ 1 - \frac{e^{\kappa(\beta-x_i)}}{3} \right]^2.$$

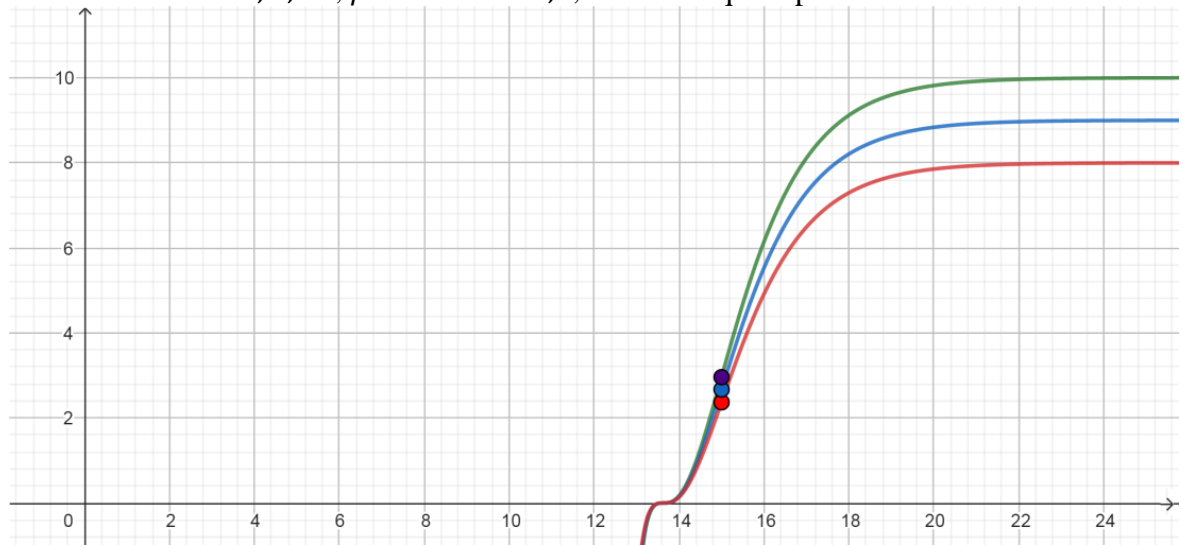
Observa-se que  $\frac{dY}{dx} \geq 0$ , então a função do modelo é crescente,  $\frac{dY}{dx} = 0$  em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(3)$ , mas este ponto crítico não é de máximo nem de mínimo.

A derivada de segunda ordem é:

$$\frac{d^2Y}{dx^2} = \alpha \kappa^2 e^{\kappa(\beta-x_i)} \left[ 1 - \frac{e^{\kappa(\beta-x_i)}}{3} \right].$$

Observa-se que  $\frac{d^2Y}{dx^2} = 0$  em  $x = \beta$  e em  $x = \beta - \frac{1}{\kappa} \ln(3)$ , ou seja, o modelo tem dois pontos de inflexão. Para  $x < \beta - \frac{1}{\kappa} \ln(3)$ , o modelo assume valores negativos, portanto, este intervalo não será considerado, e para  $x > \beta - \frac{1}{\kappa} \ln(3)$  o modelo assume valores positivos. Este intervalo é de existência da variável  $x$ . O ponto de inflexão tem coordenadas  $I = \left( \beta, \alpha \left( \frac{2}{3} \right)^3 \right)$ . Observa-se que a ordenada do ponto de inflexão é proporcional ao valor do parâmetro  $\alpha$ . No intervalo  $x < \beta - \frac{1}{\kappa} \ln(3)$ , o modelo apresenta concavidade voltada para baixo, no intervalo  $\beta - \frac{1}{\kappa} \ln(3) < x < \beta$ , o modelo tem concavidade voltada para cima; no intervalo  $x > \beta$  tem concavidade voltada para baixo. Na Figura 2.20, há um exemplo do modelo von Bertalanffy com parâmetros  $\beta = 15$ ,  $\kappa = 0,8$ ,  $\kappa = 1$  e  $\alpha = 8, 9, 10$ .

Figura 2.20 – Representação da curva sigmoideal do modelo von Bertalanffy com parâmetros  $\alpha = 8, 9, 10$ ,  $\beta = 15$  e  $\kappa = 0,8$ , com destaque o ponto de inflexão da curva.



Fonte: Do autor (2022)

No Modelo von Bertalanffy, as derivadas têm o mesmo significado do modelo Logístico. A derivada de terceira ordem é:

$$\frac{d^3Y}{dx^3}(x) = \frac{\alpha\kappa^3 e^{\kappa(\beta-x)} [3e^{2\kappa(\beta-x)} - 8e^{\kappa(\beta-x)} + 3]}{3}.$$

Observa-se que  $\frac{d^3Y}{dx^3}(x) = 0$  em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{4-\sqrt{7}}{3}\right)$  e  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{4+\sqrt{7}}{3}\right)$ . Ou seja, esses são os pontos críticos da função aceleração.

A derivada de quarta ordem é:

$$\frac{d^4Y}{dx^4}(x) = \frac{\alpha\kappa^4 e^{\kappa(\beta-x)} [-9e^{2\kappa(\beta-x)} + 16e^{\kappa(\beta-x)} - 3]}{3}.$$

Ela permite classificar os pontos críticos da função aceleração. Temos que:

$$\frac{d^4Y}{dx^4}\left(\beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{4-\sqrt{7}}{3}\right)\right) = -\alpha\kappa^4 \frac{112 + 46\sqrt{7}}{27}.$$

Logo,  $\frac{d^4Y}{dx^4}\left(\beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{4-\sqrt{7}}{3}\right)\right) < 0$ , assim a aceleração máxima ocorre em

$x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{4-\sqrt{7}}{3}\right)$ . Como:

$$\frac{d^4Y}{dx^4}\left(\beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{4+\sqrt{7}}{3}\right)\right) = \alpha\kappa^4 \frac{46\sqrt{7} - 112}{27}.$$

Logo,  $\frac{d^4Y}{dx^4} \left( \beta + \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{4+\sqrt{7}}{3} \right) \right) > 0$ , então a aceleração mínima ocorre em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{4+\sqrt{7}}{3} \right)$ .

### Modelo Richards

Em 1959, Richards propôs um modelo com quatro parâmetros na tentativa de generalizar os modelos de crescimento, dado por:

$$Y_i = \alpha \left[ 1 + (\delta - 1) e^{\kappa(\beta - x_i)} \right]^{\frac{1}{1-\delta}} + \varepsilon_i. \quad (2.4)$$

Os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  têm a mesma interpretação do modelo Logístico, enquanto o parâmetro  $\delta$  é responsável por determinar a forma da curva e seu respectivo ponto de inflexão. Quando  $\delta$  assume os valores 0, 2/3 e 2 o modelo Richards se decompõe nos modelos Brody, von Bertalanffy e Logístico, respectivamente; e quando  $\delta \rightarrow 1$ , se decompõe no modelo Gompertz. Por essa razão, esse grupo de modelos é conhecido como "modelos da família Richards" (SEBER; WILD, 2003).

Seja  $Y = \alpha \left[ 1 + (\delta - 1) e^{\kappa(\beta - x_i)} \right]^{\frac{1}{1-\delta}}$  o modelo ajusta aos dados. Da definição (c), temos que:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \left[ e^{\kappa(\beta - x_i)} \right] = 0,$$

e da definição (d):

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \left[ e^{\kappa(\beta - x_i)} \right] = +\infty.$$

Assim,

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} Y = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left\{ \alpha \left[ 1 + (\delta - 1) e^{\kappa(\beta - x_i)} \right]^{\frac{1}{1-\delta}} \right\} = \alpha \left[ 1 + (\delta - 1) \cdot 0 \right]^{\frac{1}{1-\delta}} = \alpha,$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} Y = \alpha$$

e

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} Y = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left\{ \alpha \left[ 1 + (\delta - 1) e^{\kappa(\beta - x_i)} \right]^{\frac{1}{1-\delta}} \right\} = \alpha \left[ 1 + (\delta - 1) \cdot (+\infty) \right]^{\frac{1}{1-\delta}},$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} Y = \begin{cases} 0, & \text{se } \delta > 1 \\ -\infty, & \text{se } \delta < 1 \end{cases}$$

Logo, das definições (a) e (b), podemos concluir que  $Y = 0$  e  $Y = \alpha$  são as assíntotas horizontais para  $\delta > 1$  e, quando  $\delta < 1$ , apenas  $Y = \alpha$  é assíntota horizontal no modelo ajustado.

A derivada de primeira ordem é:

$$\frac{dY}{dx} = \alpha \kappa e^{\kappa(\beta-x_i)} [1 + (\delta - 1)e^{\kappa(\beta-x_i)}]^{1-\delta},$$

observa-se que:

- se  $\delta < 1$ , a função do modelo é crescente e possui ponto crítico, em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(1 - \delta)$ ;
- se  $\delta > 1$ , então  $\frac{dY}{dx} < 0$  e a função do modelo é estritamente crescente, sem ponto crítico.

A derivada de segunda ordem é:

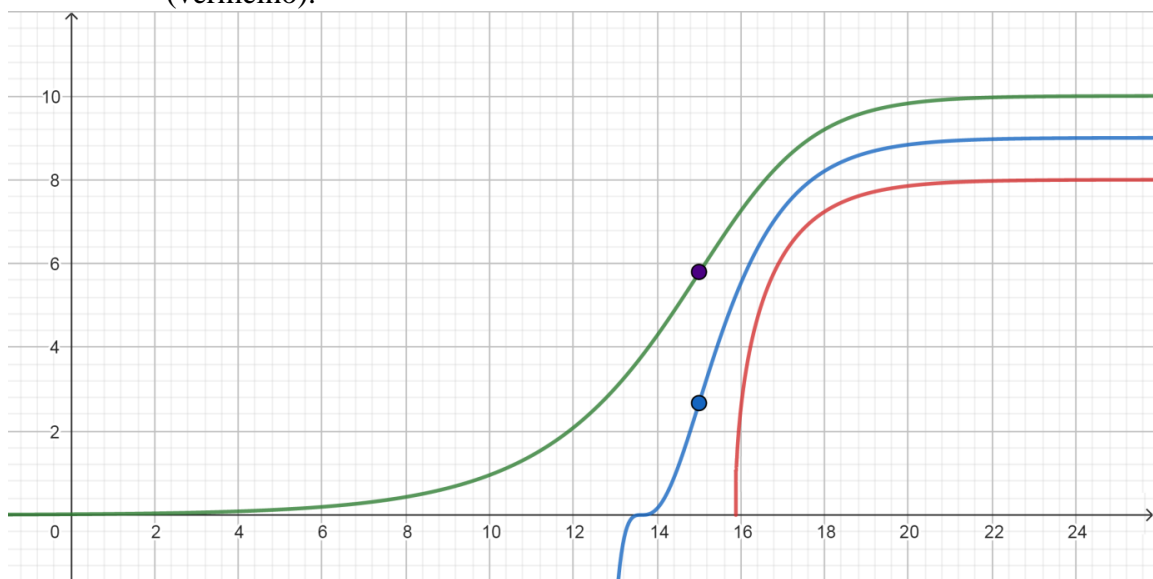
$$\frac{d^2Y}{dx^2} = -\alpha \kappa^2 e^{\kappa(\beta-x_i)} [1 - e^{\kappa(\beta-x_i)}] [1 + (\delta - 1)e^{\kappa(\beta-x_i)}]^{2\delta-1},$$

observa-se que:

- se  $\delta < 1$ , a função do modelo possui dois pontos de inflexão em  $x = \beta$  e em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(1 - \delta)$ ;
- se  $\delta > 1$ , a função do modelo possui ponto de inflexão em  $x = \beta$ .

Na figura 2.21, é apresentada a representação das curvas do modelo Richards com parâmetros  $\beta = 15$  e  $\kappa = 0,8$ , variando parâmetro  $\alpha = 10$  com  $\delta = 3$ ,  $\alpha = 9$  com  $\delta = 2/3$  e  $\alpha = 8$  com  $\delta = -1$ .

Figura 2.21 – Curvas da família Richards com os parâmetros  $\beta = 15$  e  $\kappa = 0,8$ : parâmetro  $\alpha = 10$  com  $\delta=3$  (verde),  $\alpha = 9$  com  $\delta = 2/3$  (azul) e  $\alpha = 8$  com  $\delta = -1$  (vermelho).



Fonte: Do autor (2022)

A derivada de terceira ordem é:

$$\frac{d^3Y}{dx^3} = \alpha\kappa^3 e^{\kappa(\beta-x_i)} [1 - (\delta + 2)e^{\kappa(\beta-x_i)} + e^{2\kappa(\beta-x_i)}] [1 + (\delta - 1)e^{\kappa(\beta-x_i)}]^{\frac{3\delta-2}{1-\delta}},$$

observa-se que:

a) se  $\delta < -4$  ou  $0 < \delta < 1$ , a função aceleração do possui três pontos críticos em

$$x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(1 - \delta), \quad \text{em} \quad x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta+2-\sqrt{\delta^2+4\delta}}{2}\right) \quad \text{e} \quad \text{em} \\ x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta+2+\sqrt{\delta^2+4\delta}}{2}\right);$$

b) se  $-4 < \delta < 0$ , a função aceleração possui um ponto crítico em

$$x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(1 - \delta);$$

c) se  $\delta > 1$ , a função do modelo possui dois pontos críticos em

$$x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta+2-\sqrt{\delta^2+4\delta}}{2}\right) \text{ e em } x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta+2+\sqrt{\delta^2+4\delta}}{2}\right).$$

A derivada de quarta ordem é:

$$\frac{d^4Y}{dx^4} = \alpha\kappa^4 e^{\kappa(\beta-x_i)} [-1 + (3\delta + 2)e^{\kappa(\beta-x_i)} - (2\delta^2 + 6\delta)e^{2\kappa(\beta-x_i)} \\ + (2\delta - 1)e^{3\kappa(\beta-x_i)}] [1 + (\delta - 1)e^{\kappa(\beta-x_i)}]^{\frac{4\delta-3}{1-\delta}},$$

observa-se que:

a) temos que  $\frac{d^4Y}{dx^4}\left(\beta + \frac{1}{\kappa} \ln(1 - \delta)\right) = 0$ , logo, o teste não é conclusivo para classifica o ponto de abscissa  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln(1 - \delta)$ ;

b) temos que  $\frac{d^4Y}{dx^4}\left(\beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta+2-\sqrt{\delta^2+4\delta}}{2}\right)\right) = \frac{4\alpha\kappa^4}{(\delta+2-\sqrt{\delta^2+4\delta})^4} [3\delta^3 + 29\delta - 8 - \\ (4\delta^2 + 10\delta + 15)\sqrt{\delta^2 + 4\delta}] \left(\frac{3\delta-\sqrt{\delta^2+4\delta}}{\delta+2-\sqrt{\delta^2+4\delta}}\right)^{\frac{4\delta-3}{1-\delta}}$ . Para  $\delta < -4$  ou  $\delta > 0$ , temos que  $\frac{d^4Y}{dx^4}\left(\beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta+2-\sqrt{\delta^2+4\delta}}{2}\right)\right) < 0$ ; logo a função tem aceleração máxima em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta+2-\sqrt{\delta^2+4\delta}}{2}\right)$ ;

c) temos que  $\frac{d^4Y}{dx^4}\left(\beta + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta+2+\sqrt{\delta^2+4\delta}}{2}\right)\right) = \frac{4\alpha\kappa^4}{(\delta+2+\sqrt{\delta^2+4\delta})^4} [-5\delta^2 - 12\delta + \\ (-8\delta + 4)\sqrt{\delta^2 + 4\delta}] \left(\frac{3\delta+\sqrt{\delta^2+4\delta}}{\delta+2+\sqrt{\delta^2+4\delta}}\right)^{\frac{4\delta-3}{1-\delta}}$ . Para  $\delta < -4,2536$ , a função tem aceleração mínima, para  $-4,2536 < \delta < -4$  a função tem aceleração máxima;

para  $0 < \delta < 0,1728$ , a função tem aceleração mínima; e para  $\delta > 0,1728$ , a função tem aceleração máxima em  $x = \beta + \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{\delta + 2 + \sqrt{\delta^2 + 4\delta}}{2} \right)$ .

### 2.11.6 Análise dimensional de parâmetros

O princípio básico da análise dimensional é o de homogeneidade dimensional na equação. Isso significa que, para realizar operações de adição e de subtração, é necessário de grandezas físicas com as mesmas dimensões, ou seja, não se pode somar ou subtrair grandezas distintas, por exemplo, Joule, metro e hora. Entretanto, pode se multiplicar ou dividir grandezas físicas com dimensões distintas, Tabela 2.3.

Quadro 2.1 – Grandezas, Unidades no Sistema Internacional e Unidades Dimensionais.

Grandeza	Unidade SI	Unidade Dimensional
Comprimento	Metro	L
Tempo	Segundo	T
Energia	Joule	J

Fonte: Do autor (2024).

Efetuada a análise dimensional do Modelo Logístico:

$$Y = \frac{\alpha}{1 + e^{\kappa(\beta-x)}}$$

A variável  $Y$  é medida em  $J/m^2$  e a variável  $x$  é medida em horas, que um múltiplo da unidade padrão do SI:

$$[Y] = \left[ \frac{\alpha}{1 + e^{\kappa(\beta-x)}} \right],$$

$$JL^{-2} = \frac{[\alpha]}{[1 + e^{\kappa(\beta-x)}]}$$

O termo  $1 + e^{\kappa(\beta-x)}$  é adimensional, então:

$$JL^{-2} = \frac{[\alpha]}{[1]},$$

$$[\alpha] = JL^{-2}.$$

Logo, o parâmetro  $\alpha$  tem a mesma dimensão da variável  $Y$ .

Como  $1 + e^{\kappa(\beta-x)}$  é adimensional, então  $e^{\kappa(\beta-x)}$  é adimensional, e assim  $\kappa(\beta - x)$  é adimensional. Portanto:

$$[\kappa(\beta - x)] = [1],$$

$$[\kappa][\beta - x] = [1].$$

Pelo princípio da homogeneidade dimensional, o parâmetro  $\beta$  e a variável  $x$  tem a mesma dimensão, ou seja,  $[\beta] = [x] = T$ . Portanto:

$$[\kappa][\beta - x] = [1],$$

$$[\kappa]T = [1],$$

$$[\kappa] = T^{-1}.$$

Ao realizar-se a análise dimensional dos Modelos Logístico, von Bertalanffy e Gompertz conclui-se que os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  têm a mesma dimensão podendo-se inferir que têm o mesmo significado.

### 2.11.7 Estimação dos parâmetros em modelos não lineares

Para ajustar um modelo não linear a um conjunto de dados, a estimação dos parâmetros é geralmente feita pelo método dos mínimos quadrados, que consiste na minimização das somas de quadrados dos resíduos (DRAPER; SMITH, 1998). Para a aplicação desse método, não é necessário que nenhuma pressuposição seja satisfeita; no entanto, para que se possam fazer inferências sobre as estimativas dos parâmetros, é preciso que alguns pressupostos em relação ao vetor de erros sejam atendidos, tais como erros independentes, identicamente distribuídos com distribuição normal de média zero e variância homogênea (SEBER; WILD, 2003).

Segundo Frühauf (2018, p. 28) e Salvador (2022, p.22), o método dos mínimos quadrados pode ser classificado de acordo com a sua estrutura de erros das seguintes maneiras: ordinário, ponderado e generalizado.

#### Método dos mínimos quadrados ordinário

O método dos mínimos quadrados ordinário é aquele cuja estrutura dos erros não viola nenhuma das pressuposições, ou seja,  $\varepsilon \sim N(0, I\sigma^2)$ . Para ilustrar o método dos mínimos quadrados ordinários, considere uma equação de regressão não linear como definida em (2.1). Esta equação pode ser escrita na forma matricial da seguinte maneira:

$$Y = f(X, \Theta) + \varepsilon$$

ou

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(X_1, \theta) \\ f(X_2, \theta) \\ \vdots \\ f(X_n, \theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

em que:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}' &= [Y_1 \ Y_2 \ \cdots \ Y_n]; \\ [f(\mathbf{X}, \theta)]' &= [f(X_1, \theta) \ f(X_2, \theta) \ \cdots \ f(X_n, \theta)]; \\ \boldsymbol{\varepsilon}' &= [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \cdots \ \varepsilon_n]. \end{aligned}$$

Esse método consiste na estimação dos parâmetros através da minimização da soma de quadrados dos resíduos (SQR). Essa soma, associada à equação acima, é dada pela seguinte expressão:

$$\text{SQR}(\theta) = \boldsymbol{\varepsilon}' \cdot \boldsymbol{\varepsilon},$$

logo,

$$\begin{aligned} \text{SQR}(\theta) &= [\mathbf{Y} - f(\mathbf{X}, \theta)]' \cdot [\mathbf{Y} - f(\mathbf{X}, \theta)], \\ \text{SQR}(\theta) &= \mathbf{Y}' \cdot \mathbf{Y} - \mathbf{Y}' \cdot f(\mathbf{X}, \theta) - [f(\mathbf{X}, \theta)]' \cdot \mathbf{Y} + [f(\mathbf{X}, \theta)]' \cdot f(\mathbf{X}, \theta), \\ \text{SQR}(\theta) &= \mathbf{Y}' \cdot \mathbf{Y} - 2\mathbf{Y}' \cdot f(\mathbf{X}, \theta) + [f(\mathbf{X}, \theta)]' \cdot f(\mathbf{X}, \theta). \end{aligned}$$

Esta é uma forma quadrática e seu ponto crítico é obtido derivando-se  $\text{SQR}(\theta)$  em relação à  $\theta$  e igualando-se a derivada a zero. Assim,

$$\frac{\partial \text{SQR}(\theta)}{\partial \theta} = -2\mathbf{Y}' \times \frac{\partial f(\mathbf{X}, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial [f(\mathbf{X}, \theta)]'}{\partial \theta} \times f(\mathbf{X}, \theta) + [f(\mathbf{X}, \theta)]' \times \frac{\partial f(\mathbf{X}, \theta)}{\partial \theta},$$

em que  $\frac{\partial f(\mathbf{X}, \theta)}{\partial \theta}$  é a matriz das derivadas parciais, conhecida como matriz jacobiana, de dimensões  $n \times p$ , sendo  $n$  o número de observações e  $p$  a quantidade de parâmetros do modelo. Essa matriz pode ser representada como:

$$\frac{\partial f(\mathbf{X}, \theta)}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x_1, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f(x_1, \theta)}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial f(x_1, \theta)}{\partial \theta_p} \\ \frac{\partial f(x_2, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f(x_2, \theta)}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial f(x_2, \theta)}{\partial \theta_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(x_n, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f(x_n, \theta)}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial f(x_n, \theta)}{\partial \theta_p} \end{bmatrix}$$

seja

$$J = \frac{\partial f(\mathbf{X}, \theta)}{\partial \theta}$$

e

$$\frac{\partial \text{SQR}(\theta)}{\partial \theta} = 0,$$

temos que:

$$\begin{aligned} -2Y' \times J + J' \times f(\mathbf{X}, \hat{\theta}) + [f(\mathbf{X}, \hat{\theta})]' \times J &= 0, \\ -2Y' \times J + 2[f(\mathbf{X}, \hat{\theta})]' \times J &= 0, \\ [f(\mathbf{X}, \hat{\theta})]' \times J &= Y' \times J, \\ J' \times f(\mathbf{X}, \hat{\theta}) &= J' \times Y. \end{aligned}$$

Esse é o sistema de equações normais (SEN) para o modelo não linear, no qual a matriz  $J$  e  $f(\mathbf{X}, \theta)$  dependem de  $\theta$ , logo esse sistema não possui uma solução explícita para  $\hat{\theta}$ .

### 2.11.8 Métodos iterativos

A estimação de mínimos quadrados dos parâmetros em modelos não lineares, diferentemente dos modelos lineares, conduz a um sistema de equações normais sem solução explícita. Por isso, as estimativas são obtidas através de métodos iterativos (DRAPER; SMITH, 1998).

Segundo Frühauf (2018, p. 32), existem, na literatura, vários métodos iterativos para obtenção dessas estimativas, sendo os mais utilizados, o método de Gauss-Newton ou método da linearização, o método Steepest-Descent, ou método do gradiente; e o método de Marquardt. A iteração consiste em determinar  $\theta^{n+1}$  a partir de  $\theta^n$  usando um vetor  $\lambda^n$ , ou seja,

$$\theta^{n+1} = \theta^n + \lambda^n.$$

De acordo Silva (2018, p. 23) e Borba et al. (2004, p. 8), os métodos iterativos usuais se diferenciam basicamente pela forma como  $\lambda^n$  é calculado.

Se o objetivo é minimizar a soma de quadrado dos erros  $SQE(\theta)$ , então  $SQE(\theta^{n+1})$  deve ser menor que  $SQE(\theta^n)$ . Deve-se adotar algum critério de parada e esperar que haja convergência. O critério pode ser quando a próxima atualização do parâmetro não for significativa em relação à anterior ou quando a diferença da soma de quadrados entre elas for muito pequena.

No método de Newton:

$$\theta^{n+1} = \theta^n + (H^n)^{-1} J' \varepsilon,$$

em que  $(H^n)^{-1}$  é a inversa da hessiana. Neste método a aproximação de  $SQE(\theta^{n+1})$  em  $\theta^n$  por expansão da série de Taylor:

$$SQE(\theta^{n+1}) = SQE(\theta^n) + (\theta^{n+1} - \theta^n)'SQE(\theta^n) + \frac{1}{2}(\theta^{n+1} - \theta^n)'H^n(\theta^{n+1} - \theta^n),$$

a matriz hessiana  $H^n$  pode não ser definida fora da região do mínimo, o que pode resultar na falta de convergência (FERNANDES, 2020).

O método de Gauss-Newton parte do problema de minimizar a soma de quadrado dos erros do modelo 2.12. Depois de encontrar a hessiana, parte da equação é descartada por contribuir pouco para a estimação (SILVEIRA et al., 2018):

$$\theta^{n+1} = \theta^n + (J'J)^{-1} J' \varepsilon.$$

Em qualquer método iterativo, a escolha adequada de valores iniciais é de suma importância, pois dessa escolha influencia diretamente a rapidez da convergência e diminui a possibilidade do algoritmo convergir para mínimos locais. A qualidade desses valores iniciais está ligada a experiência do pesquisador e/ou a resultados prévios obtidos de estudos anteriores.

### 2.11.9 Análise de resíduos

Como foi visto, em Estatística, existem vários erros que afetam a variável resposta, dentre eles os mais comuns são os erros de mensuração, pois, por mais preciso que seja um instrumento de medida, sempre existirá uma imprecisão associada a ele.

Esses erros correspondem às diferenças entre os valores da variável resposta  $Y$  e a curva "verdadeira", isto é, a curva dada pelos valores populacionais dos parâmetros. No entanto, como na maioria das vezes os ajustes dos modelos são feitos utilizando amostras, não é possível encontrar os valores "reais" desses parâmetros, mas apenas os valores estimados. Assim, após o ajuste dos modelos, as diferenças encontradas entre os valores observados e os estimados não são os erros verdadeiros, mas sim os erros estimados, denominados resíduos. A análise desses resíduos é extremamente importante para verificar a adequação do modelo.

Os erros devem se comportar de acordo com as seguintes pressuposições (FRÜHAUF, 2018; CALEGARIO, 2004):

- a) os erros têm média zero, ou seja,  $E(\varepsilon_i) = 0$ ;
- b) os erros são normalmente distribuídos. A suposição de normalidade dos erros é importante, pois está diretamente relacionada à forma da distribuição amostral da variável resposta. Os erros são uma soma de fatores que não foram incorporados ao modelo e, como são muitos fatores, pelo Teorema do Limite Central, essa soma deverá seguir uma distribuição normal;

- c) os erros são homocedásticos, isto é,  $Var(\varepsilon_i) = E(\varepsilon_i^2) = \sigma^2$  (constante). Caso os erros não possuam variância constante, os estimadores de mínimos quadrados, apesar de não viesados, perdem sua eficiência, e os desvios-padrão podem subestimar ou superestimar os valores verdadeiros;
- d) os erros são independentes, isto é,  $Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_{i'}) = 0$  se  $i \neq i'$ . Assim como no caso de erros heterocedásticos, na presença de erros autocorrelacionados, os estimadores de mínimos quadrados continuam sendo não viesados, porém perdem sua eficácia, afetando diretamente a estimação dos parâmetros.

Caso haja a violação de algum dos pressupostos, as inferências sobre os parâmetros do modelo ficam prejudicadas, e esse desvio deve ser corrigido ou incorporado ao modelo (SILVA, 2018).

### 2.11.10 Critérios para seleção de modelos

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk (1965) permite verificar o pressuposto de normalidade dos resíduos, no qual a hipótese nula é de que os resíduos seguem uma distribuição normal com média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$ . A estatística do teste é calculada pela seguinte expressão (FRÜHAUF, 2018; SALVADOR, 2022):

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.1)$$

em que  $\bar{x}$  é a média amostral dos resíduos;  $x_i$  são os valores amostrais residuais ordenados ( $x_1$  é o menor valor) e  $b$  é um valor calculado com base nas médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra aleatória com  $n$  elementos de uma distribuição normal. Valores menores de  $W$  são evidências de desvio de normalidade.

O teste de Breusch-Pagan (1979) permite verificar o pressuposto de homocedasticidade das variâncias residuais, tendo como hipótese nula que as variâncias residuais são homogêneas. Esse teste é realizado, inicialmente, ajustando uma regressão linear simples com os resíduos padronizados, e sua estatística é dada por (FRÜHAUF, 2018):

$$BP = \frac{SQR}{2}, \quad (3.2)$$

em que SQR é a soma dos quadrados da regressão. O valor calculado de BP deve ser comparado com o valor crítico da distribuição de qui-quadrado, com 1 grau de liberdade.

O teste de Durbin-Watson permite verificar a independência dos resíduos, tendo como hipótese nula que os resíduos são independentes. A estatística do teste é dada por (FRÜHAUF, 2018; SALVADOR, 2022):

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}, \quad (3.3)$$

em que  $\varepsilon_i$  é o resíduo relacionado à observação no tempo  $i$  e  $\varepsilon_{i-1}$  é o resíduo relacionado à observação no tempo  $i - 1$ .

A estatística de teste  $D$  é um valor entre 0 e 4. Valores calculados próximos de 0 indicam presença de autocorrelação positiva; próximos de 2 os resíduos são independentes; e próximos de 4 indicam presença de autocorrelação negativa.

Quando os resíduos apresentaram autocorrelação significativa, o que geralmente ocorre devido ao fato de os dados serem obtidos ao longo do tempo, é necessário considerar um parâmetro de autocorrelação de primeira ordem (AR1) no processo de estimação, o qual é incorporado ao resíduo da seguinte maneira:

$$\varepsilon_i = \phi_1 \varepsilon_{i-1} + a_i, \quad (3.4)$$

em que  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $\varepsilon_i$  é o resíduo no tempo  $i$ ;  $\varepsilon_{i-1}$  é o resíduo gerado no tempo  $i - 1$ ;  $\phi_1$  é o parâmetro de autocorrelação de primeira ordem; e  $a_i$  é o erro puro (ruído branco).

É comum, em pesquisas, o ajuste de vários modelos para descrever um fenômeno. Contudo, após obtidas as estimativas dos parâmetros, é necessário utilizar algum critério que permita ao pesquisador a comparar e selecionar o modelo que melhor se ajusta aos dados.

O desvio padrão residual indica a distância entre os valores observados e as estimativas do modelo ajustado, gerando assim o valor de desvio residual. O modelo que apresentar o menor valor do desvio padrão residual (DPR) é considerado o mais adequado. O DPR é dado por:

$$DPR = \sqrt{QMR},$$

em que QMR é o quadrado médio residual.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho é de natureza quantitativa. Os dados das estações meteorológicas foram obtidos no histórico do Instituto Nacional de Meteorologia. A modelagem foi realizada por meio de um método iterativo, aplicado em MNL, utilizando o software estatístico R.

#### **3.1 Natureza da pesquisa**

A pesquisa é de natureza quantitativa e busca investigar, por meio de análise estatística, a relação entre a variável independente "tempo", medida em horas UTC, e a variável dependente "irradiação acumulada ao longo do dia", medida em kJ/m<sup>2</sup>. Neste caso, pretende-se determinar como a variável preditora explica estatisticamente o comportamento da variável resposta (PORTO, 2014).

#### **3.2 Obtenção dos dados**

Os dados são de fonte primária, obtidos a partir do histórico de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), referentes a 17 cidades representativas das regiões e biomas brasileiros. Nas planilhas do INMET, há dados meteorológicos disponíveis a partir do ano 2000, sendo que o período de cinco anos entre 2018 e 2022 foi selecionado. Em cada cidade, foram considerados dois solstícios e dois equinócios, totalizando 68 conjuntos de dados de irradiação global, medidos em kJ/m<sup>2</sup>. A proposta é que os dados dos fenômenos estudados nesta pesquisa, em articulação com os elementos presentes na fundamentação teórica, forneçam as informações necessárias para elucidar o problema proposto.

##### **3.2.1 Localização das estações meteorológicas**

A localização das estações é apresentada pelo código da World Meteorological Organization (WMO), latitude e longitude, respectivamente. Na Região Centro-Oeste, estão Brasília, estação A001 (-15,78940, -47,92580), e Campo Grande, estação A702 (-20,44710, -54,72260). Na Região Norte, estão Rio Branco, estação A102 (-9,76970, -68,15530), Humaitá, estação A112 (-7,55250, -63,07140), Manaus, estação A101 (-3,10330, -60,01640), e Macapá, estação A249 (0,03500, -51,08890). Na Região Nordeste, estão São

Luís, estação A203 (-2,52670, -44,21360), Petrolina, estação A307 (-9,38830, -40,52330), Recife, estação A301 (-8,05920, -34,95920), e Mossoró, estação A318 (-4,90420, -37,36690). Na Região Sul, estão Curitiba, estação A807 (-25,44860, -49,23060), Santa Maria, estação A803 (-29,72500, -53,72060), e Santa Vitória do Palmar, estação A899 (-33,74220, -53,37220). Na Região Sudeste, estão Vitória, estação A612 (-20,27080, -40,30580), Belo Horizonte, estação A521 (-19,88390, -43,96940), Rio de Janeiro, estação A602 (-22,98830, -43,19060), e São Paulo, estação A701 (-23,72450, -46,67750).

### 3.2.2 Dados das cidades da região Centro Oeste

As cidades selecionadas na Região Centro-Oeste são Brasília – DF e Campo Grande – MS. Os dados referem-se à média horária acumulada da irradiação global, medida no nível do solo, nos equinócios e solstícios de 2018 a 2022. As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os dados de Brasília e Campo Grande, respectivamente.

Tabela 3.1 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A001, da cidade de Brasília – DF, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	77,16	4,98	82,30	233,48
12:00	2.251,10	1.578,16	1.309,46	1.917,72
14:00	7.202,52	5.892,64	4.464,98	5.359,18
16:00	13.388,74	11.437,24	8.619,78	9.734,22
18:00	18.464,46	16.242,72	11.607,80	12.200,54
20:00	21.096,30	18.752,90	12.974,10	13.786,26
22:00	21.546,82	18.938,60	13.124,90	14.106,88
24:00	21.547,40	18.938,60	13.124,90	14.114,48

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.2 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A702, da cidade de Campo Grande – MS, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	0,73	0,00	32,48	115,20
12:00	1.039,43	682,13	1.901,28	1.589,73
14:00	4.359,20	3.696,43	6.693,68	5.747,90
16:00	8.684,73	8.285,60	13.074,13	11.228,58
18:00	12.100,70	12.624,03	18.941,03	15.339,20
20:00	15.658,00	14.897,03	22.527,28	18.138,75
22:00	16.708,33	15.200,50	23.208,10	19.378,23
24:00	16.708,33	15.207,50	23.208,10	19.406,33

Fonte: Do autor (2023).

### 3.2.3 Dados das cidades da região Norte

As cidades da Região Norte selecionadas são Rio Branco – AC, Humaitá – AM, Manaus – AM e Macapá – AP. Os dados referem-se ao acúmulo da média horária da irradiação global, medida no nível do solo, durante os equinócios e solstícios de 2018 a 2022. As Tabelas 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam os dados de Rio Branco, Humaitá, Manaus e Macapá, respectivamente.

Tabela 3.3 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A102, da cidade de Rio Branco – AC, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	2,63	0,00	0,00	0,03
12:00	245,50	494,55	412,90	477,23
14:00	2.283,78	3.097,25	2.953,64	2.503,17
16:00	6.679,28	8.165,85	7.446,18	6.287,33
18:00	11.304,45	13.343,40	11.179,08	11.242,65
20:00	13.514,28	16.245,15	14.394,42	14.834,38
22:00	14.401,65	17.721,05	15.906,54	16.559,72
24:00	14.438,23	17.735,70	15.930,06	16.648,48

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.4 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A112, da cidade de Humaitá – AM, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	0,05	0,63	0,17	0,90
12:00	524,95	695,30	732,23	603,20
14:00	3.229,85	3.742,20	3.656,30	2.982,45
16:00	7.478,80	7.741,83	6.942,17	5.557,80
18:00	10.246,20	11.544,30	10.876,00	9.749,10
20:00	12.750,50	14.158,40	13.216,67	13.125,40
22:00	13.583,05	15.070,73	14.038,27	14.022,90
24:00	13.591,75	15.078,60	14.039,03	14.047,35

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.5 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A101, da cidade de Manaus – AM, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	0,00	0,32	40,08	3,06
12:00	897,70	709,70	1.529,88	833,62
14:00	4.510,18	3.501,08	5.870,08	2.907,66
16:00	9.209,98	8.086,20	11.166,32	5.271,06
18:00	12.223,92	12.344,66	15.621,52	6.305,54
20:00	14.188,18	15.319,70	18.018,70	7.009,10
22:00	14.692,66	15.904,48	18.572,28	7.361,92
24:00	14.694,24	15.904,58	18.572,28	7.362,98

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.6 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A249, da cidade de Macapá – AP, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	18,98	32,08	114,23	62,47
12:00	1.416,28	1.441,95	2.724,63	1.800,50
14:00	5.146,60	5.657,63	8.214,83	6.258,60
16:00	10.102,40	11.601,15	15.364,13	12.076,23
18:00	13.806,08	16.319,80	21.640,95	17.054,47
20:00	15.887,33	18.414,65	25.205,50	19.729,57
22:00	16.178,48	18.845,53	25.484,50	20.081,77
24:00	16.178,48	18.845,53	25.484,50	20.081,77

Fonte: Do autor (2023).

### 3.2.4 Dados das cidades da região Nordeste

As cidades da Região Nordeste selecionadas são Petrolina – PE, São Luís – MA, Recife – PE e Mossoró – RN. Os dados referem-se ao acúmulo da média horária da irradiação global medida no nível do solo, durante os equinócios e solstícios de 2018 a 2022. As Tabelas 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10 registram os dados de São Luís, Petrolina, Recife e Mossoró, respectivamente.

Tabela 3.7 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A203, da cidade de São Luis – MA, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	161,80	91,30	279,55	211,05
12:00	2.297,40	2.405,60	2.689,45	2.595,25
14:00	6.139,55	6.696,10	7.011,75	6.720,50
16:00	11.252,45	10.252,43	11.652,65	11.168,55
18:00	16.073,65	13.166,43	16.932,75	14.908,40
20:00	18.896,75	14.410,77	19.556,20	16.581,20
22:00	19.135,50	14.491,67	19.689,10	16.664,95
24:00	19.135,50	14.491,67	19.689,10	16.664,95

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.8 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A307, da cidade de Petrolina – PE, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	126,93	62,00	286,08	231,28
12:00	1.826,08	1.187,98	2.386,33	2.553,80
14:00	5.334,38	3.873,95	6.520,45	6.503,25
16:00	9.588,23	7.165,60	11.463,25	10.862,03
18:00	13.717,95	9.709,73	15.800,43	14.378,70
20:00	16.022,08	11.269,13	17.856,18	16.221,88
22:00	16.295,45	11.388,03	18.006,00	16.466,35
24:00	16.295,45	11.388,03	18.006,00	16.466,35

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.9 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A301, da cidade de Recife – PE, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	3,67
10:00	1.053,48	411,03	929,23	1.525,60
12:00	5.886,40	3.692,20	4.612,98	6.561,10
14:00	10.484,78	8.996,08	9.552,78	12.381,57
16:00	15.927,78	14.352,95	14.291,30	17.989,07
18:00	21.925,05	18.387,35	18.521,28	22.884,57
20:00	24.226,45	19.841,45	20.115,55	25.154,23
22:00	24.256,20	19.844,18	20.120,23	25.196,07
24:00	24.256,20	19.844,18	20.120,23	25.196,07

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.10 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A318, da cidade de Mossoró – RN, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	498,10	407,75	767,57	922,70
12:00	3.882,00	3.286,65	4.919,93	5.129,00
14:00	9.853,97	8.891,65	11.301,70	11.528,00
16:00	16.885,03	14.695,50	18.294,17	18.704,70
18:00	22.389,13	18.821,40	23.623,47	24.300,20
20:00	24.630,47	20.338,35	25.663,47	26.808,15
22:00	24.725,37	20.364,80	25.694,93	26.907,00
24:00	24.725,37	20.364,80	25.694,93	26.907,00

Fonte: Do autor (2023).

### 3.2.5 Dados das cidades da região Sul

As cidades da Região Sul selecionadas foram Curitiba – PR, Santa Maria – RS e Santa Vitória do Palmar – RS. Os dados referem-se ao acúmulo da média horária da irradiação global medida ao nível do solo, nos equinócios e solstícios de 2018 a 2022. As Tabelas 3.11, 3.12 e 3.13 apresentam os dados de Curitiba, Santa Maria e Santa Vitória do Palmar, respectivamente.

Tabela 3.11 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A807, da cidade de Curitiba – PR, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	3,31	0,00	0,68	46,14
10:00	343,33	127,36	707,63	1.789,58
12:00	2.100,25	1.579,78	3.607,60	5.650,88
14:00	3.905,91	4.561,74	8.134,23	11.103,88
16:00	6.001,37	7.461,62	12.289,25	16.147,00
18:00	7.503,07	9.205,02	15.047,60	19.215,20
20:00	7.868,05	9.497,86	15.778,55	20.663,66
22:00	7.869,95	9.497,86	15.780,40	20.782,12
24:00	7.869,95	9.497,86	15.780,40	20.782,12

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.12 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A803, da cidade de Santa Maria – RS, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	8,46	0,00	47,38	302,16
12:00	1.077,30	366,75	1.390,30	2.662,10
14:00	4.112,18	2.414,65	4.716,42	7.176,28
16:00	8.551,78	5.889,55	8.875,30	12.620,00
18:00	13.152,66	8.693,45	12.640,92	17.899,94
20:00	16.541,58	9.784,75	14.811,20	21.172,56
22:00	17.267,38	9.839,93	15.260,80	22.324,60
24:00	17.271,32	9.839,93	15.260,80	22.324,60

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.13 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A899, da cidade de Santa Vitória do Palmar – RS, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	10,80	0,70	53,85	515,33
12:00	1105,73	240,67	1602,93	4091,20
14:00	4757,30	1568,77	5307,85	10125,00
16:00	9906,57	3982,70	9961,83	17588,80
18:00	14582,13	5867,70	13961,30	24297,07
20:00	17551,07	6662,80	16067,80	28905,23
22:00	18144,87	6715,90	16410,98	30923,27
24:00	18144,87	6715,90	16410,98	31040,67

Fonte: Do autor (2023).

### 3.2.6 Dados das cidades da região Sudeste

As cidades da Região Sudeste selecionadas foram Vitória – ES, Belo Horizonte – MG, Rio de Janeiro – RJ e São Paulo – SP. Os dados referem-se ao acúmulo da média horária da irradiação global medida ao nível do solo, nos equinócios e solstícios de 2018 a 2022. As Tabelas 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17 apresentam os dados de Vitória, Belo Horizonte, Rio de Janeiro e São Paulo, respectivamente.

Tabela 3.14 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A612, da cidade de Vitória – ES, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	3,44
10:00	366,13	63,23	367,75	1.077,24
12:00	3.450,23	1.309,53	2.546,03	4.661,72
14:00	9.216,40	4.446,13	7.738,45	10.144,50
16:00	15.915,07	7.365,37	12.819,33	16.285,02
18:00	20.664,23	9.236,13	16.348,93	21.196,48
20:00	22.139,80	9.776,20	17.500,20	23.105,16
22:00	22.198,20	9.776,23	17.513,30	23.219,78
24:00	22.198,20	9.776,23	17.513,30	23.219,78

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.15 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A521, da cidade de Belo Horizonte – MG, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,04	0,00	0,00	0,00
10:00	106,14	29,76	192,46	668,82
12:00	1.923,82	1.591,72	2.608,08	4.167,88
14:00	5.816,90	5.597,66	7.068,44	9.219,34
16:00	10.380,24	10.386,66	12.537,56	13.488,10
18:00	15.045,24	14.269,26	16.697,80	17.855,34
20:00	17.527,62	15.737,16	18.392,16	20.692,00
22:00	17.706,64	15.752,72	18.488,58	21.088,48
24:00	17.706,64	15.752,72	18.488,58	21.088,48

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.16 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A602, da cidade de Rio de Janeiro – RJ, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	169,82	22,62	134,98	647,22
12:00	2.358,36	1.354,52	1.897,48	3.957,78
14:00	6.885,96	4.588,14	5.468,66	8.668,16
16:00	11.344,80	8.740,16	9.774,54	14.154,36
18:00	14.913,74	12.127,32	13.495,58	17.829,54
20:00	16.876,48	13.035,00	15.077,26	19.633,82
22:00	16.975,50	13.038,50	15.128,24	19.838,92
24:00	16.975,50	13.038,50	15.128,24	19.838,92

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3.17 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , estação Meteorológica A701, da cidade de São Paulo – SP, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	48,23	1,36	110,65	406,34
12:00	1.100,85	840,76	1.744,75	2.661,52
14:00	3.866,58	3.676,82	5.361,10	6.850,22
16:00	7.854,13	7.641,68	9.835,63	11.583,16
18:00	10.418,78	10.921,60	14.525,30	15.325,38
20:00	11.685,78	12.153,54	16.464,75	17.138,44
22:00	11.829,35	12.178,82	16.554,98	17.469,16
24:00	11.829,35	12.178,82	16.554,98	17.469,16

Fonte: Do autor (2023).

### 3.3 Modelagem

Na modelagem dos modelos não lineares aos dados, foi empregado o algoritmo de convergência de Gauss-Newton, aplicado ao método dos mínimos quadrados. Na análise dos resíduos, foram aplicados os testes de Shapiro-Wilk, Breusch-Pagan e Durbin-Watson. A seleção dos modelos foi feita pela comparação dos resultados de  $R^2$ , DPR e AIC, obtidos por meio do software estatístico R.

#### 3.3.1 Modelos a serem ajustados

Os modelos não lineares utilizados foram: Logístico (2.1), Gompertz (2.2), von Bertalanffy (2.3) e Richards (2.4), nos quais  $Y_i$  representa a radiação global acumulada ao longo dia, em  $\text{kJ/m}^2$ , observada na  $i$ -ésima hora, em UTC. Os modelos foram escolhidos por pertencerem à "família Richards". Optou-se pelos modelos regressão não linear na versão simples, preservando assim pelo princípio da parcimônia.

#### 3.3.2 Método iterativo

Na estimação dos parâmetros dos modelos, foi utilizado, como padrão, o algoritmo de convergência de Gauss-Newton, também conhecido como método da linearização. Este consiste na utilização de uma expansão da série de Taylor para aproximar o modelo de regressão não linear em termos lineares, permitindo assim a aplicação do método dos

mínimos quadrados encontrando assim a estimação dos parâmetros (MAZUCHELI; ACHCAR, 2002).

Como na maioria dos métodos iterativos, o primeiro passo consiste em atribuir valores iniciais para o vetor dos parâmetros  $\theta^0 = (\alpha^0, \beta^0, \kappa^0)$ , os quais foram obtidos por meio da análise visual dos dados e também por meio da interface gráfica para ajuste de modelos de regressão não linear, desenvolvida com as ferramentas do pacote rpanel do software livre R (R Core Team, 2023).

### 3.3.3 Análise de resíduo

Para verificar o pressuposto de normalidade dos resíduos, foi utilizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, no qual a hipótese nula é de que os resíduos seguem uma distribuição normal com média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$ . Para verificar o pressuposto de homocedasticidade de variâncias residuais, foi utilizado o teste de Breusch-Pagan, cuja hipótese nula é a homogeneidade das variâncias residuais. Para verificar a independência dos resíduos, foi utilizado o teste de Durbin-Watson, cuja hipótese nula é a independência dos resíduos.

### 3.3.4 Intervalo de confiança para os parâmetros

Com o pressuposto de normalidade dos resíduos validado, construíram-se os intervalos de confiança para os parâmetros, segundo Draper e Smith (1998) os quais são dados por:

$$IC(\theta_i) = \hat{\theta}_i \pm t_{(v, \frac{\alpha}{2})} \sqrt{\widehat{Var}(\hat{\theta}_i)},$$

em que,  $\hat{\theta}_i$ , corresponde à estimativa do parâmetro  $\theta_i$ ;  $v$  é o número de grau de liberdade ( $v = n - p$ ) do resíduo;  $t_{(v, \frac{\alpha}{2})}$  é o quantil superior da distribuição  $t$  de Student;  $\alpha$  é o nível de significância;  $\widehat{Var}(\hat{\theta}_i)$  é a estimativa da variância da estimativa do parâmetro  $\theta_i$  obtida da diagonal da matriz assintótica de variâncias e covariâncias. Os intervalos de confiança ( $IC$ ) fornecem os limite inferior (LI) e superior (LS) (FRÜHAUF, 2018; FERNANDES, 2012).

### **3.3.5 Comparação e seleção de modelos**

Após o ajuste dos modelos, a comparação e seleção do modelo que melhor descreveu os dados foi realizada com base nos resultados encontrados para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o desvio padrão residual (DPR) e Critérios de Informação de Akaike (AIC). Considerou-se como o modelo mais bem ajustado aquele que apresentou o maior valor de  $R^2$  e menores valores para o DPR e para os Critérios de Informação (AIC).

### **3.2.6 Recursos computacionais**

A estimação dos parâmetros dos modelos, a geração de gráficos, análise de resíduos, a construção de intervalos de confiança e a verificação da qualidade do ajuste para a seleção dos modelos foram realizadas utilizando-se o software estatístico R, de acesso livre (R Core Team, 2022), com o uso dos pacotes nlme, car, lmttest, rpanel e qpcR.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo da irradiação solar global ao nível do solo, uma fonte de energia renovável, acumulada ao longo do dia, foi realizado com dados de 17 cidades, obtidos das estações meteorológicas, referentes aos solstícios e aos equinócios, totalizando 68 conjuntos de dados (Tabelas 3.1 a 3.17). As fontes de variação do acúmulo de irradiação incluem as condições meteorológicas, a latitude, a hora local e o dia do ano.

A intensidade da irradiação que atinge o topo da atmosfera varia ao longo do ano (item 2.7). O estudo de Ferreira (2006, p. 20) mostrou que a intensidade da irradiação ao nível do solo pode sofrer uma redução de até 55% em relação à intensidade máxima, conforme demonstrado na pesquisa sobre radiação solar na cidade de Sete Lagoas – MG. A variação da intensidade da irradiação ocorre também ao longo do dia (Anexo B). Segundo Souza, Silva e Ceballos (2008, p. 41), ao estimar a irradiação na ausência de nuvens na cidade de Quixeré - CE, em estudo sobre o efeito da turbidez atmosférica, na cidade de Humaitá – AM, Martins et al. (2014, p. 96) demonstraram o impacto das condições climáticas na intensidade da irradiação ao nível do solo, tal como Fagundes (2019, p. 113) investigou em 14 cidades brasileiras.

O estudo dos dados (Tabelas 3.1 a 3.17) foi realizado por meio de regressão não linear, utilizando os modelos Logístico, von Bertalanffy, Gompertz e Richards. O modelo de Richards não se ajustou a nenhum dos conjuntos de dados, e o modelo von Bertalanffy ajustou-se aos dados, mas não foi a melhor opção. Assim, prevaleceram os modelos Logístico e Gompertz. O Modelo Logístico ajustou-se melhor em 43 conjuntos de dados, enquanto o Modelo Gompertz foi superior em 25. Em algumas localidades, como Brasília, o Modelo Logístico prevaleceu em todos os cenários; em outras, o Modelo Gompertz foi dominante. Em cidades como Curitiba, nenhum modelo se destacou em todos os cenários, resultando em uma análise com ambos os modelos em 12 cidades. Nos casos em que os resultados sugeriram modelos distintos para os quatro fenômenos, optou-se por utilizar um único modelo para facilitar a comparação dos parâmetros.

### 4.1 São Luís - MA

Nos ajustes dos dados da cidade de São Luís - MA (Tabela 4.1), o modelo von Bertalanffy não atendeu aos pressupostos de homogeneidade das variâncias no Equinócio de

Primavera e de independência dos resíduos nos Equinócios e no Solstício de Verão, enquanto os modelos Gompertz e Logístico atenderam a todos os pressupostos.

Tabela 4.1 – Ajuste dos modelos aos dados de irradiação solar global acumulada ao longo do dia da cidade de São Luís – MA. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,5041	0,7055	0,2261	0,5270	0,5943	0,3156
Gompertz	0,8542	0,1294	0,3123	0,3565	0,0988	0,3251
Von Bertalanffy	0,5847	0,0917	0,0295	0,8577	0,0482	0,0551

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,9945	0,3860	0,2207	0,9766	0,5375	0,1870
Gompertz	0,4765	0,0819	0,4471	0,5915	0,0977	0,2665
Von Bertalanffy	0,8248	0,3446	0,0057	0,9199	0,1952	0,0060

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico se ajustou melhor aos dados dos Equinócios, enquanto o modelo Gompertz foi melhor nos Solstícios (Tabela 4.2). Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) nos ajustes são superiores a 0,99, ou seja, mais de 99% da variação da irradiação global acumulada ao longo do dia é explicada pelos modelos a partir da variável independente hora, em UTC.

Tabela 4.2 – Seleção dos modelos para a cidade de São Luís – MA, desvio padrão residual (DPR), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	381,6	0,99837	122,05	512,5	0,99720	126,77
Gompertz	485,5	0,99752	125,91	589,5	0,99652	129,01

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	437,6	0,9962	124,24	378,0	0,99789	121,90
Gompertz	239,1	0,9989	114,57	357,6	0,99823	121,01

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados dos modelos Logístico e Gompertz são próximos. As estimativas dos parâmetros estimados  $\alpha$  e  $\beta$  para os dois modelos ajustados aos dados dos quatro fenômenos estão nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 – Irradiação solar acumulada máxima e parâmetros estimados  $\alpha$  (em  $\text{kJ/m}^2$ ) do ajuste dos modelos Logístico e Gompertz aos dados da cidade de São Luís – MA, com 95% de confiança.

Fenômeno	Máximo acumulado	Parâmetro $\alpha$ estimado	
		Logístico	Gompertz
Equinócio de outono	19.135,50	19.730	21.200
Solstício de inverno	14.491,67	14.590	15.230
Equinócio de primavera	19.689,10	20.410	21.920
Solstício de verão	16.664,95	16.980	17.900

Fonte: Do autor (2023).

O valor esperado para o parâmetro  $\beta$  é 15 UTC (12 horas Brasília-BR). A média das estimativas deste parâmetro no modelo Logístico é  $\hat{\beta} = 15,0175 \text{ UTC}$ , e no modelo Gompertz é  $\hat{\beta} = 14,0825 \text{ UTC}$  (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Estimativas do parâmetro  $\beta$  (em UTC) do ajuste dos modelos Logístico e Gompertz aos dados da cidade de São Luís – MA, com 95% de confiança.

Fenômeno	Parâmetro $\beta$ estimado	
	Logístico	Gompertz
Equinócio de outono	15,46	14,54
Solstício de inverno	14,47	13,54
Equinócio de primavera	15,32	14,37
Solstício de verão	14,82	13,88

Fonte: Do autor (2023).

Ao comparar as estimativas dos parâmetros nos ajustes dos modelos Logístico e Gompertz, considerando que os resultados do diagnóstico dos modelos são semelhantes, principalmente o  $R^2$ , optou-se pelo modelo Logístico para a análise dos dados da cidade de São Luís (Tabela 4.5), bem como outros conjuntos de dados neste estudo, permitindo a comparação dos parâmetros estimados.

São Luís é a capital do estado do Maranhão, localizado em uma área de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, o que implica em uma alta variabilidade climática. No noroeste do estado, o clima é tropical quente e úmido, típico da região amazônica, enquanto no sudeste predomina um clima tropical quente e semiúmido. A cidade de São Luís está inserida no bioma Amazônia. A média da radiação solar diária, em  $\text{Wh/m}^2/\text{dia}$ , em março foi de 5.171, em junho de 5.563, em setembro de 6.204 e em dezembro de 5.125, conforme a análise da série histórica de 2001 a 2014 (FEITOSA et al., 2017). Segundo Oliveira, Matos e Saavedra (2007, p. 5), as médias mensais de radiação, em  $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ , nos Lençóis Maranhenses são: 4,06 em março, 4,82 em junho, 5,79 em setembro e 5,10 em dezembro. No

ajuste dos dados de irradiação acumulada ao longo do dia, o parâmetro  $\alpha$  atinge seu valor máximo em setembro (Tabela 4.5 e Figura 4.2).

No ajuste para o Equinócio de Outono, o modelo apresentou um valor assintótico de 19.730 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão de 15,46 UTC (12:28 BRT) e  $\kappa$  de 0,5987 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Inverno, o modelo apresentou um valor assintótico de 14.590 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão de 14,47 UTC (11:28 BRT) e  $\kappa$  de 0,6509 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Equinócio de Primavera, o modelo apresentou um valor assintótico de 20.410 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão de 15,32 UTC (12:19 BRT) e  $\kappa$  de 0,5795 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Verão, o modelo apresentou um valor assintótico de 16.980 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão de 14,82 UTC (11:49 BRT) e  $\kappa$  de 0,6234 UTC<sup>-1</sup> (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de São Luís – MA, intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	19.345,0	19.730	20.115,0	19.890,1	20.410	20.929,9
$\beta$	15,33	15,46	15,59	15,15	15,32	15,49
$\kappa$	0,56206	0,5987	0,63534	0,53385	0,5795	0,62515

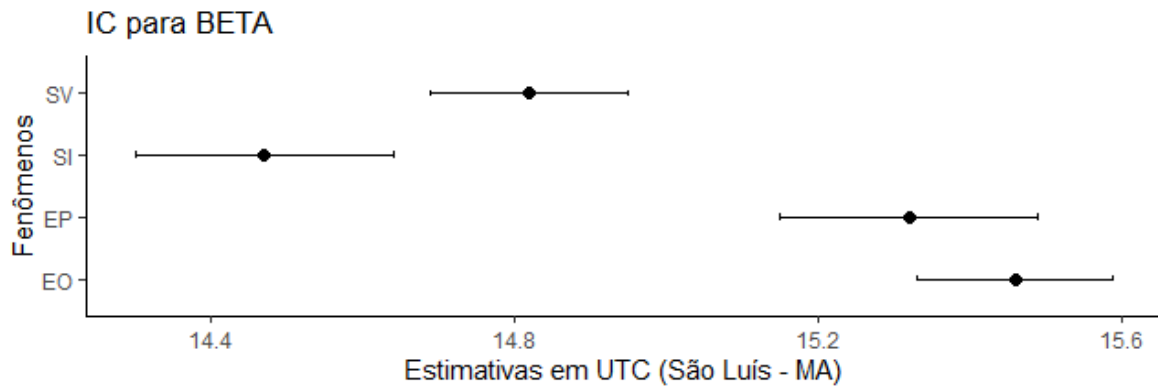
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	14.238,9	14.590	14.941,1	16.650,1	16.980	17.309,9
$\beta$	14,30	14,47	14,64	14,69	14,82	14,95
$\kappa$	0,59135	0,6509	0,71045	0,5610	0,6234	0,6858

Fonte: Do autor (2023).

Na Figura 4.1, observa-se os parâmetros  $\beta$  estimados para os equinócios são estatisticamente equivalentes. Contudo os parâmetros estimados para os solstícios não são estatisticamente equivalentes.

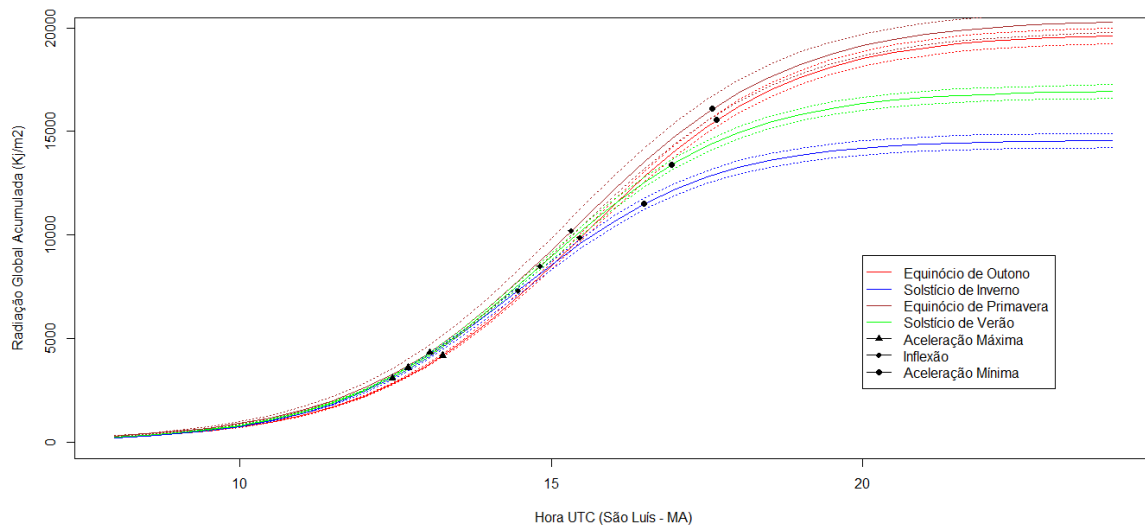
Figura 4.1 – Parâmetro  $\beta$  e com intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de São Luís – MA; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.



Fonte: Do autor (2023).

Os valores assintóticos dos equinócios são estatisticamente equivalentes; contudo, não há equivalência entre os valores assintóticos dos solstícios (Figura 4.2). No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 13:26 UTC com 4.169,44 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17:66 UTC com 15.560,56 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 12:45 UTC com 3.083,23 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:49 UTC com 11.506,77 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 13:05 UTC com 4.313,14 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17:59 UTC com 16.096,86 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 12:71 UTC com 3.588,30 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:93 UTC com 13.391,70 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.2 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração da irradiação global ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de São Luís – MA.



Fonte: Do autor (2023).

As estimativas dos valores assintóticos serem estatisticamente equivalentes nos equinócios e mínimas no Solstício de Inverno são resultados esperados. Contudo, o fato de o valor assintótico não ser máximo no Solstício de Verão é um resultado inesperado, consequência das características climáticas da cidade.

## 4.2 Bioma Mata Atlântica

No Bioma Mata Atlântica, foram estudados os dados de Recife – PE, Belo Horizonte – MG, Vitória – ES, Rio de Janeiro – RJ, São Paulo – SP e Curitiba – PR; as cidades estão organizadas em ordem decrescente de latitude.

### 4.2.1 Recife – PE

Para ajustar os dados da cidade de Recife, foi utilizado o modelo Gompertz. No ajuste para o Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 27.090 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 13,65 UTC (10:39 BRT) e  $\kappa$  de 0,3095 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 21.040 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 13,50 UTC (10:30 BRT) e  $\kappa$  de 0,4004 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Equinócio de Primavera, o modelo estimou um valor assintótico de 21.700 kJ/m<sup>2</sup>, a

abscissa do ponto de inflexão em 13,34 UTC (10:20 BRT) e  $\kappa$  de 0,3526 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 27.300 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 13,19 UTC (10:11 BRT) e  $\kappa$  de 0,3314 UTC<sup>-1</sup> (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade Recife – PE, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	25.672	27.090	28.508	21.074,3	21.700	22.325,7
$\beta$	13,38	13,65	13,92	13,19	13,34	13,49
$\kappa$	0,26896	0,3095	0,35004	0,32286	0,3526	0,38234

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	20.567,9	21.040	21.512,1	26.544,2	27.300	28.055,8
$\beta$	13,38	13,50	13,62	13,04	13,19	13,34
$\kappa$	0,37121	0,4004	0,42959	0,30533	0,3314	0,35667

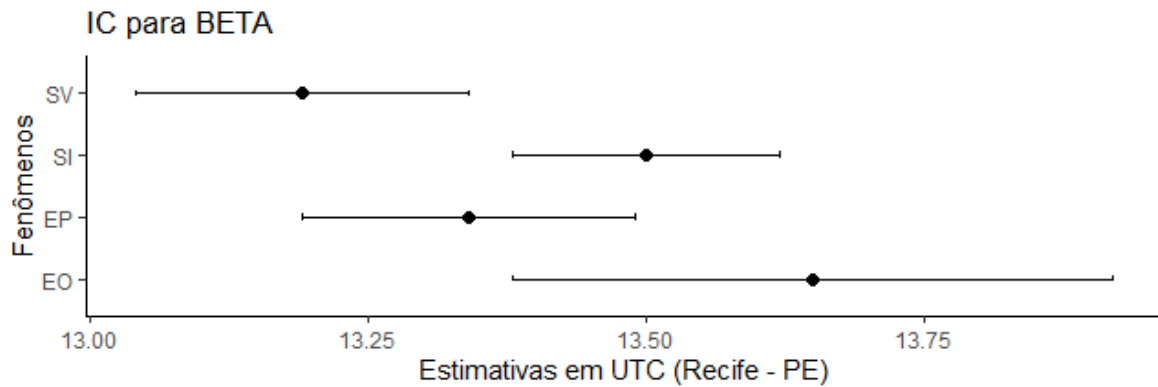
Fonte: Do autor (2023).

Situadas no litoral nordestino, Marechal Deodoro – AL e Recife – PE possuem características climáticas semelhantes. Os meses mais chuvosos são maio e junho, enquanto os meses de menor precipitação são dezembro e janeiro. Ao estudar a radiação solar global e o índice de transmissividade em floresta de mangue, na cidade de Marechal Deodoro – AL, Querino et al. (2011, p. 207) obtiveram os seguintes valores de irradiação solar média mensal: em julho, 24 MJ/m<sup>2</sup>, e em novembro, 84 MJ/m<sup>2</sup>. O fluxo máximo é de 1.300 W/m<sup>2</sup> entre 10:30 e 14:00, ocorrendo entre setembro e meados de março, época da seca na região. O menor fluxo, com pico máximo de 1.100 W/m<sup>2</sup>, ocorre entre 11:00 e 13:00 horas, nos meses de abril a agosto, durante a estação chuvosa.

As estimativas do parâmetro  $\beta$  para equinócios e solstícios (Tabela 4.12) estão dentro do intervalo encontrado por Querino et al. (2011, p. 208). Além disso, a estimativa do parâmetro  $\alpha$  assume valores maiores no solstício de verão e no equinócio de outono, e valores menores no equinócio de primavera e no solstício de inverno (Figura 4.3).

As estimativas dos parâmetros  $\beta$  para os equinócios e para o solstício de inverno são estatisticamente equivalentes. As estimativas dos parâmetros  $\beta$  para o equinócio de primavera e solstício de verão também são estatisticamente equivalentes (Figura 4.3).

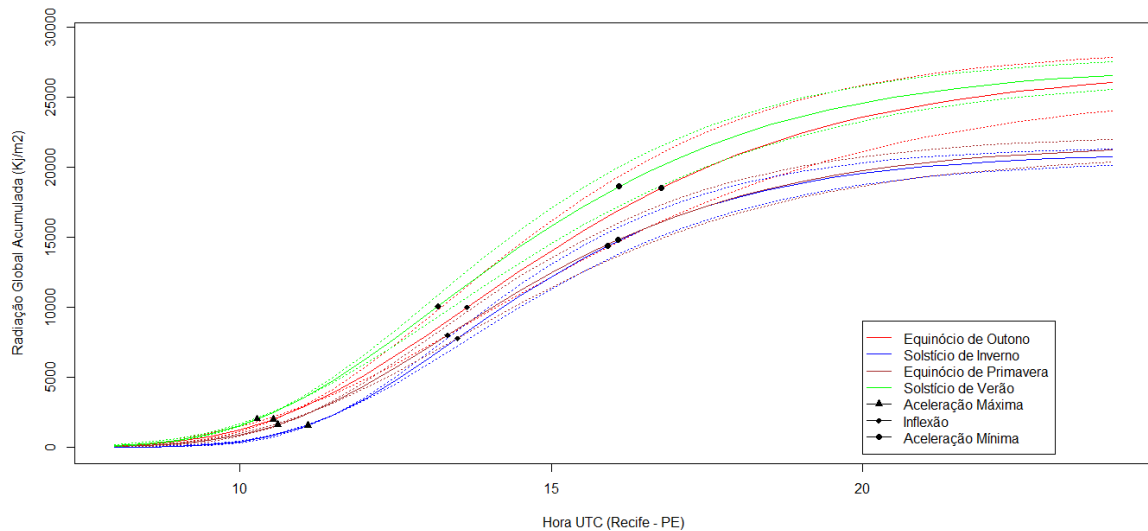
Figura 4.3 – Parâmetro  $\beta$  com intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Recife - PE; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.



Fonte: Do autor (2023).

Os valores assintóticos do Equinócio de Outono e Solstício de Verão, bem como do Equinócio de Primavera e Solstício de Inverno, são estatisticamente equivalentes (Figura 4.4). No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 12:20 UTC, com 5.331,73 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17:20 UTC, com 19.898,27 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 12:39 UTC, com 4.256,08 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:47 UTC, com 15.883,92 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 12:07 UTC, com 4.346,95 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:63 UTC, com 16.223,05 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 11:83 UTC, com 5.443,73 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:65 UTC, com 20.316,27 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.4 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração da irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Recife – PE.



Fonte: Do autor (2023).

A estimativa do parâmetro  $\alpha$  ser mínima no Solstício de Inverno é esperada; contudo, sua equivalência estatística com a do Equinócio de Primavera é inesperada. A estimativa do parâmetro  $\alpha$  ser máxima no Solstício de Verão é esperada, mas sua equivalência estatística com a do Equinócio de Outono não é. As condições climáticas descritas evidenciam a presença de fontes de perturbação da irradiação solar global na cidade de Recife – PE (QUERINO et al., 2011).

#### 4.2.2 Belo Horizonte – MG

A ocorrência de atenuação acentuada da irradiação solar no verão, associada ao maior período de insolação, e a menor atenuação no inverno, com menor período de insolação, podem ser fatores que resultam em valores próximos de irradiação global acumulada na cidade de Belo Horizonte nos solstícios e equinócios (Tabela 4.7).

Segundo Ferreira (2006, p.20), em Sete Lagoas – MG, situada a 70 km da capital, a radiação global é atenuada em aproximadamente 55% no verão, ao atravessar a atmosfera. “Nos meses de junho a agosto, há menor cobertura de nuvens, principalmente devido à entrada de frentes frias, que possibilitam a permanência de grandes massas de ar frio e seco por período mais prolongado.” No verão, os dias são mais longos; contudo, os maiores valores de insolação foram encontrados no inverno. O maior percentual de atenuação ocorre

no verão, cerca de 55,6%, sendo a presença de nuvens, e conseqüentemente a maior incidência de vapor de água e aerossóis na atmosfera, o principal agente redutor da radiação incidente. As menores atenuações ocorrem no inverno, podendo chegar a 36,8% de redução em relação ao total incidente no topo da atmosfera. Características próprias do cerrado mineiro, como relevo montanhoso e altitude elevada, também influenciam a atenuação da irradiação solar.

O Modelo Logístico foi utilizado para ajustar os dados de irradiação global acumulada diária da cidade de Belo Horizonte. No ajuste referente ao Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 18.240 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 15,43 UTC (12:26-BRT) e  $\kappa$  de 0,6115 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste referente ao Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 16.010 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 15,02 UTC (12:01-BRT) e  $\kappa$  de 0,7008 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste referente ao Equinócio de Primavera, o modelo estimou um valor assintótico de 18.790 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 14,85 UTC (11:51-BRT) e  $\kappa$  de 0,6579 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste referente ao Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 21.620 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 14,84 UTC (11:50-BRT) e  $\kappa$  de 0,5262 UTC<sup>-1</sup>, conforme apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Belo Horizonte – MG, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	17.849,8	18.240	18.630,2	18.513,7	18.790	19.066,3
$\beta$	15,29	15,43	15,57	14,75	14,85	14,95
$\kappa$	0,5695	0,6115	0,6535	0,62237	0,6579	0,69343

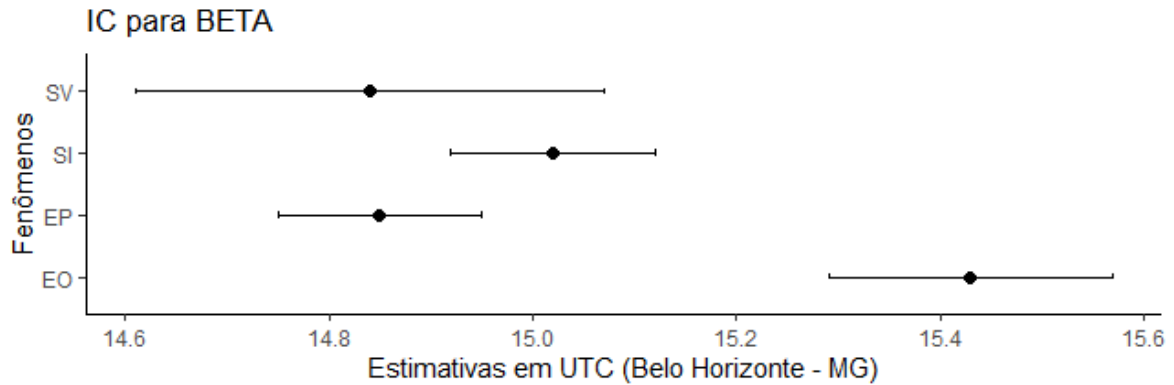
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	15.759,9	16.010	16.260,1	20.926,5	21.620	22.313,5
$\beta$	14,92	15,02	15,12	14,61	14,84	15,07
$\kappa$	0,65915	0,7008	0,74245	0,47559	0,5262	0,57681

Fonte: Do autor (2023).

As estimativas dos parâmetros  $\beta$  para os solstícios e o Equinócio de Primavera são estatisticamente equivalentes. No entanto, a estimativa do parâmetro  $\beta$  para o Equinócio de Outono não apresenta equivalência com as demais, conforme mostrado na Figura 4.5.

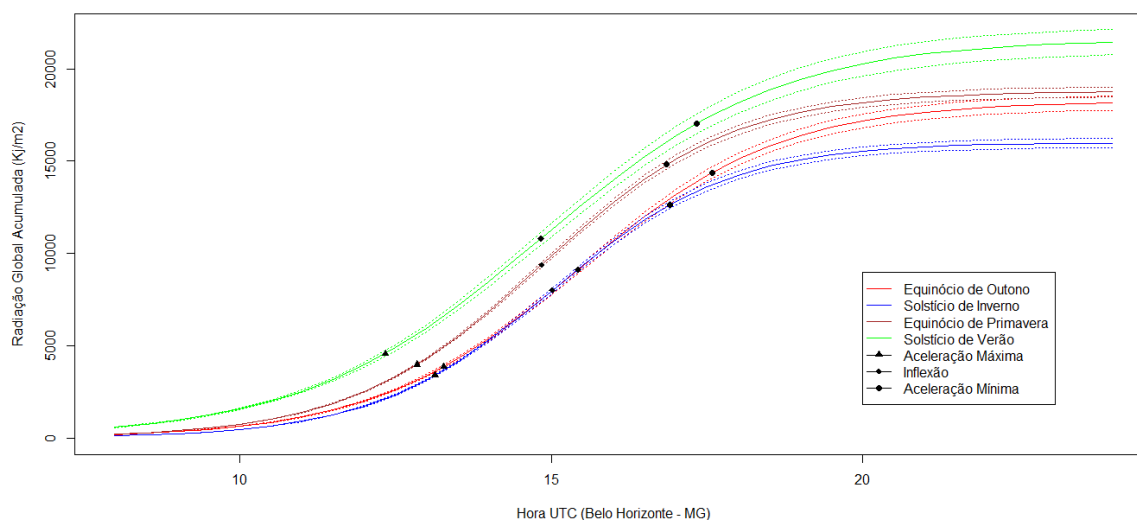
Figura 4.5 – Parâmetro  $\beta$  e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Belo Horizonte – MG. SV: Solstício de Verão, SI: Solstício de Inverno, EP: Equinócio de Primavera, EO: Equinócio de Outono.



Fonte: Do autor (2023).

Os valores assintóticos para os Equinócios são estatisticamente equivalentes, conforme mostrado na Figura 4.6. No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 13:28 UTC com 3.854,57 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17:58 UTC com 14.385,43 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 13:14 UTC com 3.383,31 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:90 UTC com 12.626,69 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 12:85 UTC com 3.970,79 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:85 UTC com 14.819,21 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 12:34 UTC com 4.568,84 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17:34 UTC com 17.051,16 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.6 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração da irradiação global acumulada ao longo do dia nos Equinócios e nos Solstícios na cidade de Belo Horizonte - MG.



Fonte: Do autor (2023).

As estimativas do parâmetro  $\alpha$  apresentaram valores esperados, sendo o mínimo observado no Solstício de Inverno, o máximo no Solstício de Verão, e valores estatisticamente equivalentes e próximos à média dos extremos nos Equinócios. A análise climática do cerrado e os dados apresentados por Ferreira (2006, p. 20) corroboram os resultados obtidos para a cidade de Belo Horizonte – MG.

#### 4.2.3 Vitória – ES

O Espírito Santo apresenta ótimos índices de radiação solar direta, assim como os demais estados do Sudeste. O índice varia entre 4,8 e 5,3 kWh/m<sup>2</sup>/dia (LUCHINI; ALVARENGA; GUIMARÃES, 2020), o que justifica os elevados valores do parâmetro  $\alpha$  no equinócio de outono e no solstício de verão (Tabela 4.8 e Figura 4.8).

Na cidade de Vitória, a média anual da precipitação pluviométrica foi de 1.320 mm no período de 1978 a 2007, com chuvas intensas de novembro a janeiro e seca entre maio e setembro. Os fenômenos meteorológicos que influenciam diretamente as condições climáticas no município são a Zona de Convergência do Atlântico Sul, Frentes Frias e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (BARBOZA; BEZERRA NETO; CAIANA, 2020). A medição da irradiação com desvio azimutal de 100° N, em kWh/m<sup>2</sup>/dia, na cidade de Colatina – ES, foi de 5,36 em março, 4,13 em junho, 4,34 em setembro e 5,28 em dezembro (SALVADOR et

al., 2019). O comportamento do parâmetro  $\alpha$  estimado para a cidade de Vitória é análogo, com os valores mais altos ocorrendo no equinócio de outono e no solstício de verão, e o menor no solstício de inverno. No equinócio de primavera, há um valor intermediário (Tabela 4.8 e Figura 4.8).

O Modelo Logístico foi utilizado para ajustar os dados da cidade de Vitória. Para o Equinócio de Outono, o modelo estimou o valor assintótico em 22.520 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 14,60 UTC (11:36 BRT) e o  $\kappa$  em 0,6813 UTC<sup>-1</sup>. Para o Solstício de Inverno, o modelo estimou o valor assintótico em 9.823,9 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 14,28 UTC (11:17 BRT) e o  $\kappa$  em 0,7532 UTC<sup>-1</sup>. Para o Equinócio de Primavera, o modelo estimou o valor assintótico em 17.690 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 14,48 UTC (11:29 BRT) e o  $\kappa$  em 0,7004 UTC<sup>-1</sup>. Para o Solstício de Verão, o modelo estimou o valor assintótico em 23.740 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 14,55 UTC (11:37 BRT) e o  $\kappa$  em 0,5914 UTC<sup>-1</sup> (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Estimativas dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Vitória – ES, intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	22.228,2	22.520	22.811,8	17.456,5	17.690	17.923,5
$\beta$	14,51	14,60	14,69	14,39	14,48	14,57
$\kappa$	0,64696	0,6813	0,71564	0,66311	0,7004	0,73769

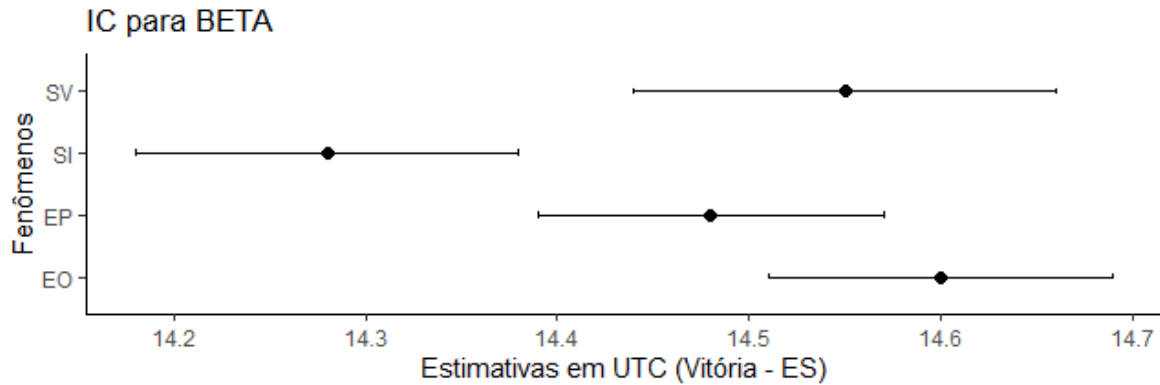
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	9.676,20	9.823,9	9.971,66	23.371,1	23.740	24.108,9
$\beta$	14,18	14,28	14,38	14,44	14,55	14,66
$\kappa$	0,7042	0,7532	0,8022	0,55961	0,5914	0,62319

Fonte: Do autor (2023).

Os parâmetros  $\beta$  estimados para os equinócios e para o solstício de verão são estatisticamente equivalentes. O parâmetro  $\beta$  estimado para o solstício de inverno, no entanto, não possui equivalência com os demais (Figura 4.7).

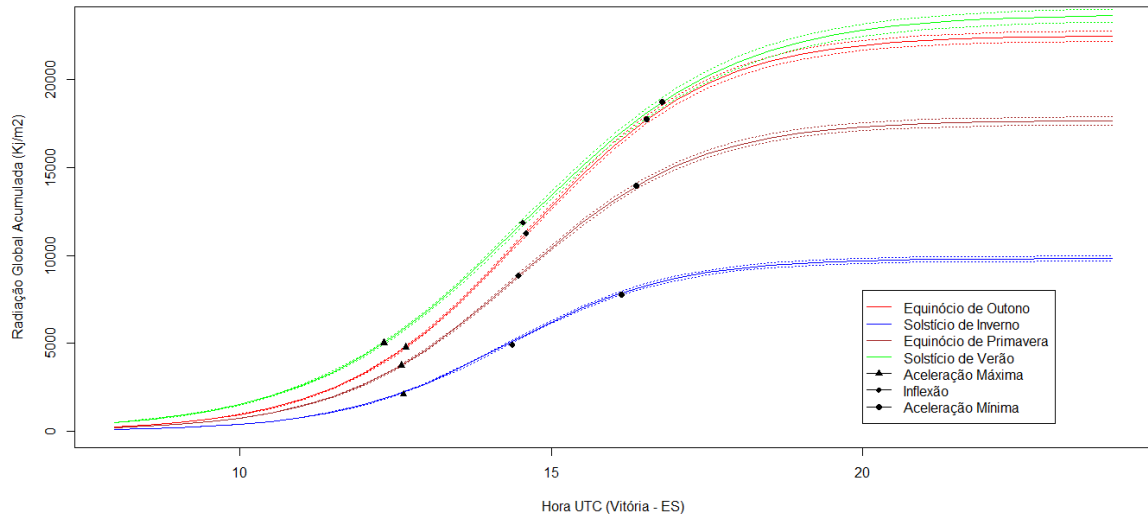
Figura 4.7 – Parâmetro  $\beta$  e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Vitória – ES. SV: Solstício de Verão; SI: Solstício de Inverno; EP: Equinócio de Primavera; EO: Equinócio de Outono.



Fonte: Do autor (2023).

Os valores assintóticos não são estatisticamente equivalentes (Figura 4.8). No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 12,67 UTC com 4.759,04 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,53 UTC com 17.760,96 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 12,63 UTC com 2.075,84 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,13 UTC com 7.747,16 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 12,60 UTC com 3.738,34 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,36 UTC com 13.951,66 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 12,32 UTC com 5.061,85 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,78 UTC com 18.723,15 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.8 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Vitória – ES.



Fonte: Do autor (2023).

A amplitude das estimativas de  $\beta$  é de 0,32 UTC, ou seja, aproximadamente 19 minutos. A estimativa do parâmetro  $\alpha$  foi mínima no Solstício de Inverno, máxima no Solstício de Verão e, no Equinócio de Primavera, próxima à média dos extremos, resultados esperados. Contudo, a estimativa do parâmetro  $\alpha$  para o Equinócio de Outono ser próxima ao máximo não era um resultado esperado.

#### 4.2.4 Rio de Janeiro

O estudo dos dados da cidade do Rio de Janeiro foi realizado utilizando o Modelo Logístico. No ajuste para o Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 17.220 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 14,48 UTC (11:29 BRT) e um valor de  $\kappa$  de 0,6288 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 13.270 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 14,98 UTC (11:59 BRT) e um valor de  $\kappa$  de 0,7272 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Equinócio de Primavera, o modelo estimou um valor assintótico de 15.460 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 15,05 UTC (12:03 BRT) e um valor de  $\kappa$  de 0,6483 UTC<sup>-1</sup>. Por fim, no ajuste para o Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 20.100 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão em 14,50 UTC (11:30 BRT) e um valor de  $\kappa$  de 0,6061 UTC<sup>-1</sup>, conforme apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade do Rio Janeiro – RJ, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	16.848,1	17.220	17.591,9	15.203,2	15.460	15.716,8
$\beta$	14,69	14,84	14,99	14,94	15,05	15,16
$\kappa$	0,5808	0,6288	0,6768	0,61013	0,6483	0,68647

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	13.077,7	13.270	13.462,3	19.777,6	20.100	20.422,4
$\beta$	14,89	14,98	15,07	14,39	14,50	14,61
$\kappa$	0,68567	0,7272	0,76873	0,57155	0,6061	0,64065

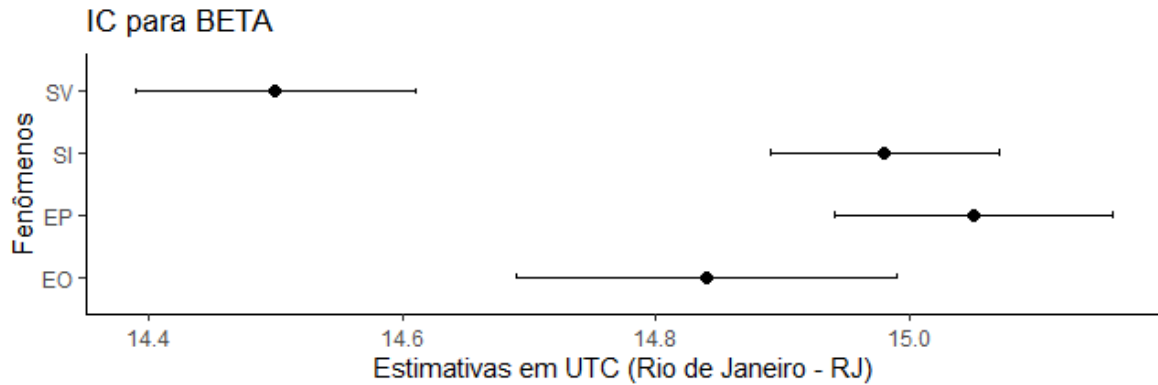
Fonte: Do autor (2023).

Segundo Carvalho et al. (2011, p. 840), há uma forte correlação entre a radiação solar no nível do solo e a evapotranspiração em Seropédica – RJ, cidade distante 70 km do Rio de Janeiro – RJ. A menor intensidade de energia foi 7,35 MJ/m<sup>2</sup>/dia em 23/05, enquanto a maior foi 26,20 MJ/m<sup>2</sup>/dia em 05/02, e o menor erro padrão ocorreu em junho, no período mais seco. A correlação no mês de maio foi de 0,885, em fevereiro foi de 0,834, e a correlação anual foi de 0,812.

O estudo realizado por Carvalho et al. (2011, p. 840) na cidade de Seropédica, localizada no Bioma Mata Atlântica, assim como a cidade do Rio de Janeiro, apresenta resultados semelhantes aos deste estudo. No parâmetro  $\alpha$ , o menor erro padrão ocorre no solstício de inverno, período mais seco, e a maior intensidade de irradiação ocorre no solstício de verão, conforme Tabela 4.9 e Figura 4.10.

Os parâmetros  $\beta$  estimados para os equinócios e para o solstício de inverno são estatisticamente equivalentes. No entanto, o parâmetro  $\beta$  estimado para o solstício de verão não apresenta equivalência com os demais, conforme ilustrado na Figura 4.9.

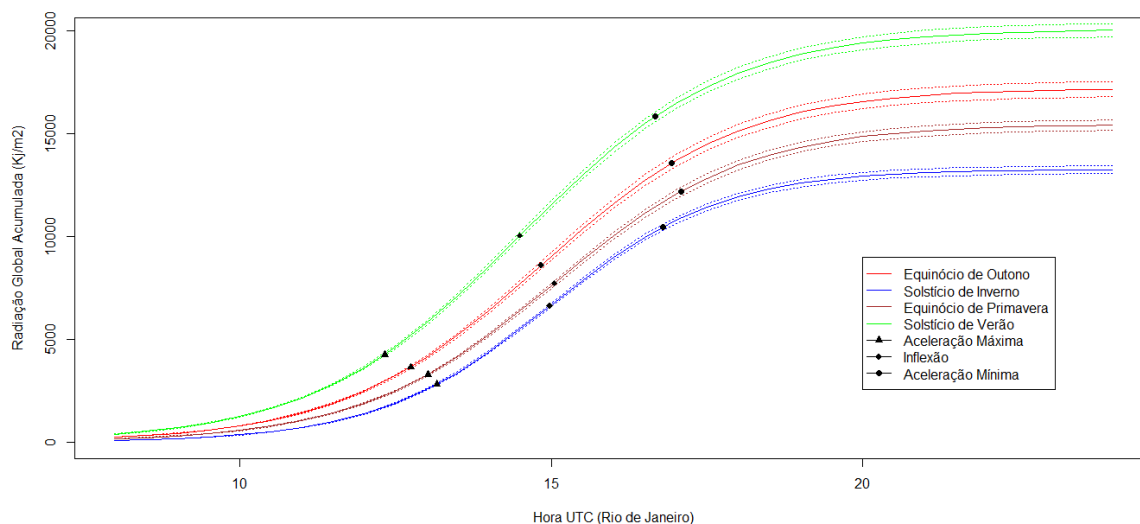
Figura 4.9 – Parâmetro  $\beta$  com intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustados aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade do Rio de Janeiro - RJ; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.



Fonte: Do autor (2023).

Os valores assintóticos não são estatisticamente equivalentes, conforme mostrado na Figura 4.10. No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 12,75 UTC com 3.639,01 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,93 UTC com 13.580,99 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 13,17 UTC com 2.804,28 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,79 UTC com 10.465,72 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 13,02 UTC com 3.267,08 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,08 UTC com 12.192,92 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 12,33 UTC com 4.247,63 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,67 UTC com 15.852,37 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.10 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios na cidade do Rio de Janeiro - RJ.



Fonte: Do autor (2023).

A estimativa do parâmetro  $\alpha$  apresenta um valor mínimo no Solstício de Inverno, um valor máximo no Solstício de Verão, e valores próximos à média dos extremos nos equinócios, o que era esperado. Entretanto, as estimativas para os equinócios não são estatisticamente equivalentes, o que não era esperado. Este fato pode ser justificado pela variação das velocidades médias do vento, que oscilam entre 2,8 e 8,7 m/s. Segundo Oliveira Júnior et al. (2013, p. 457), sazonalmente ocorre variação na velocidade do vento nas estações de transição (outono e primavera).

#### 4.2.5 São Paulo - SP

No ajuste aos dados da cidade de São Paulo, o Modelo Logístico estimou, para o Equinócio de Outono, um valor assintótico de 11.900 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 15,08 UTC (12:05 BRT) e um  $\kappa$  de 0,7164 UTC<sup>-1</sup>. Para o Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 12.370 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 15,28 UTC (12:17 BRT) e um  $\kappa$  de 0,7403 UTC<sup>-1</sup>. Para o Equinócio de Primavera, o modelo estimou um valor assintótico de 17.030 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 15,37 UTC (12:22 BRT) e um  $\kappa$  de 0,6424 UTC<sup>-1</sup>. Para o Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 17.720 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 14,88 UTC (11:53 BRT) e um  $\kappa$  de 0,6093 UTC<sup>-1</sup> (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores, do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de São Paulo – SP, intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	11.764,9	11.900	12.035,1	16.701,1	17.030	17.358,9
$\beta$	15,01	15,08	15,15	15,24	15,37	15,50
$\kappa$	0,68511	0,7164	0,74769	0,60041	0,6424	0,68439

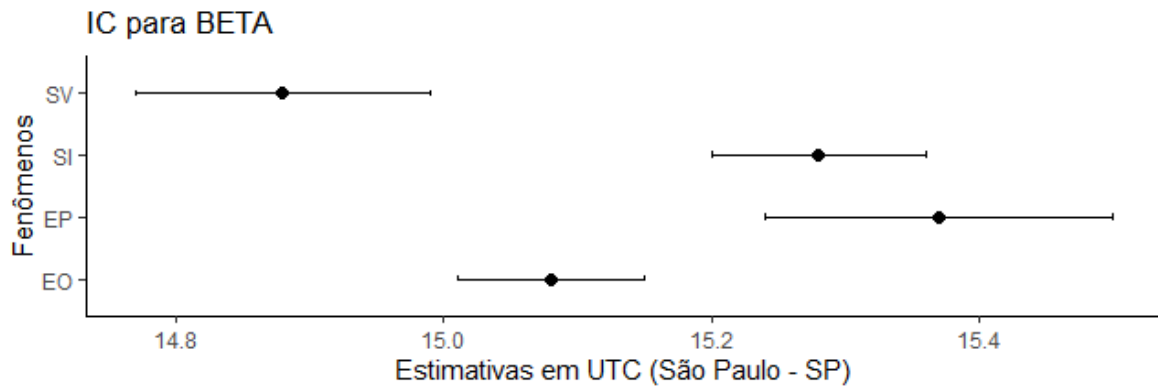
Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	12.207,7	12.370	12.532,3	17.451,4	17.720	17.988,6
$\beta$	15,20	15,28	15,36	14,77	14,88	14,99
$\kappa$	0,70269	0,7403	0,77791	0,5777	0,6093	0,6409

Fonte: Do autor (2023).

Ao estudar o efeito da radiação solar em floresta semidecídua no município de Jundiá – SP, Hernandez, Pedro Júnior e Bardin (2004) registraram que o valor médio de radiação solar diária no ambiente externo à mata foi de 23,3 MJ/m<sup>2</sup>/d no verão e 22,5 MJ/m<sup>2</sup>/d na primavera, resultados semelhantes aos obtidos no ajuste dos dados do Solstício de Verão e do Equinócio de Primavera na cidade de São Paulo, em que o valor do parâmetro  $\alpha$  apresenta valores mais elevados (Tabela 4.10 e Figura 4.12). No inverno, a radiação solar média diária tem o menor valor, 14,9 MJ/m<sup>2</sup>/d, o que também é consistente com os resultados obtidos em São Paulo, onde os menores valores assintóticos foram observados no Solstício de Inverno e no Equinócio de Outono (Tabela 4.10 e Figura 4.12).

Os parâmetros  $\beta$  estimados para o Equinócio de Primavera e para o Solstício de Inverno são estatisticamente equivalentes. Entretanto, não há equivalência entre os parâmetros  $\beta$  estimados para o Solstício de Verão e o Equinócio de Outono (Figura 4.11).

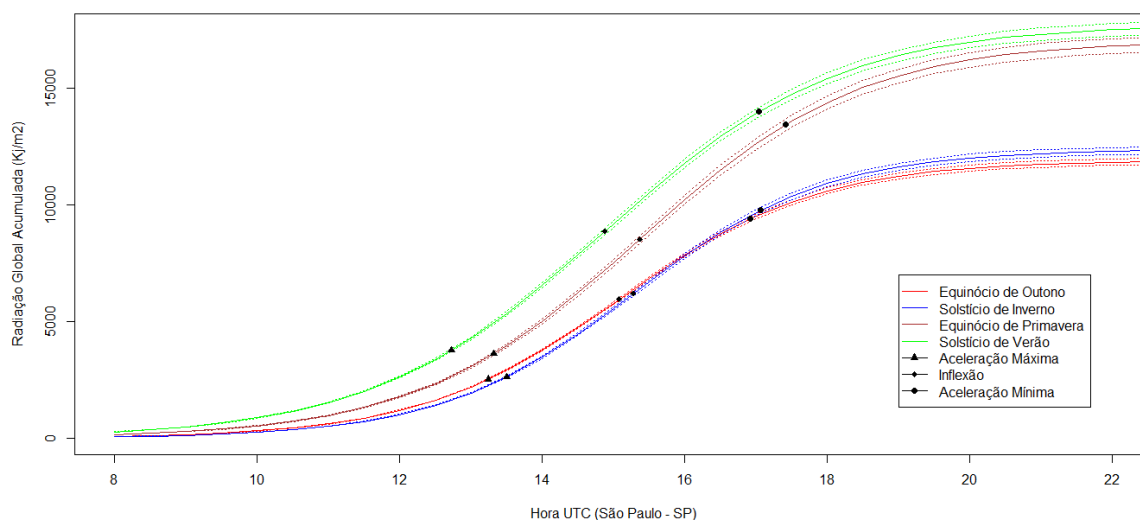
Figura 4.11 – Parâmetro  $\beta$  estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de São Paulo - SP; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.



Fonte: Do autor (2023).

Os valores assintóticos não são estatisticamente equivalentes (Figura 4.12). No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 12,75 UTC com 3.639,01 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,93 UTC com 13.580,99 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 13,17 UTC com 2.804,28 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,79 UTC com 10.465,72 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 13,02 UTC com 3.267,08 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,08 UTC com 12.192,92 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 12,33 UTC com 4.247,63 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,67 UTC com 15.852,37 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.12 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, e irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de São Paulo – SP.



Fonte: Do autor (2023).

A estimativa do parâmetro  $\alpha$  ser máxima no Solstício de Verão é um resultado esperado. No entanto, o fato de ser mínima no Equinócio de Outono não era esperado. Outro resultado inesperado é que o valor do parâmetro  $\alpha$  no Equinócio de Primavera é próximo ao máximo. Segundo Marciotto, Oliveira e Escobedo (2008, p. 3), as medidas de radiação global no verão foram de 22,0 MJ/m<sup>2</sup> e, no inverno, de 14,0 MJ/m<sup>2</sup>. As medidas do PM-IAG foram de 18,4 MJ/m<sup>2</sup> no verão e de 11,9 MJ/m<sup>2</sup> no inverno. Essas diferenças não estão relacionadas apenas a erros de mensuração e devem ser atribuídas ao efeito da poluição na Região Metropolitana de São Paulo.

#### 4.2.6 Curitiba - PR

A modelagem dos dados de Curitiba – PR estimou um valor de 9.868 kJ/m<sup>2</sup> para o Solstício de Inverno e de 22.030 kJ/m<sup>2</sup> para o Solstício de Verão (Tabela 4.11), valores próximos aos encontrados para a cidade de Cascavel. Segundo Drechmer e Ricieri (2006, p. 75), os valores de irradiação global medidos em Cascavel – PR foram de 11,01 MJ/m<sup>2</sup> em junho e 20,48 MJ/m<sup>2</sup> em dezembro.

Os dados da cidade de Curitiba foram ajustados utilizando o Modelo Gompertz. No Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 8.384 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 13,04 UTC (10:02 BRT) e um  $\kappa$  de 0,3766 UTC<sup>-1</sup>. Para o Solstício de

Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 9.868 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 13,35 UTC (10:21 BRT) e um  $\kappa$  de 0,4852 UTC<sup>-1</sup>. No Equinócio de Primavera, o valor assintótico estimado foi de 16.570 kJ/m<sup>2</sup>, com uma abscissa do ponto de inflexão de 13,06 UTC (10:04 BRT) e um  $\kappa$  de 0,4148 UTC<sup>-1</sup>. Para o Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 22.030 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 12,82 UTC (09:49 BRT) e um  $\kappa$  de 0,3600 UTC<sup>-1</sup> (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Gompertz ajustados aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Curitiba – PR, intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	13.870,3	14.410	14.949,7	16.235,6	16.570	16.904,4
$\beta$	13,23	13,42	13,62	12,95	13,06	13,17
$\kappa$	0,33587	0,3803	0,42473	0,38546	0,4148	0,44414

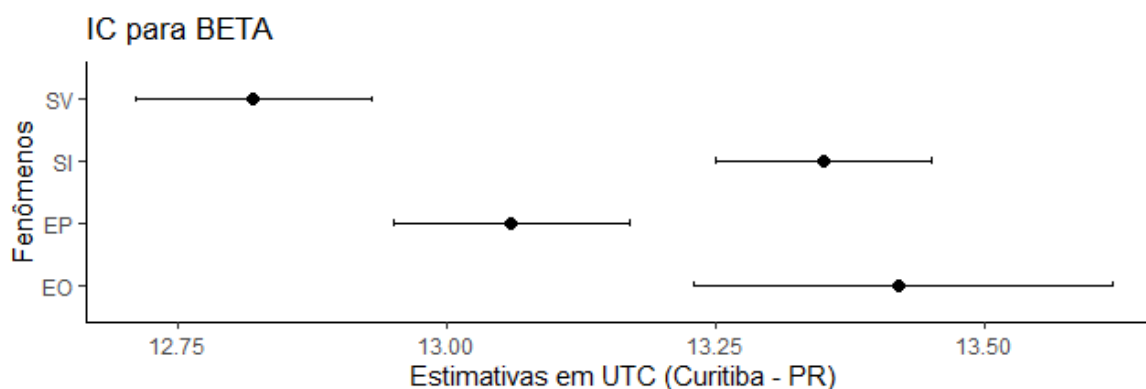
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	9.681,5	9.868	10.054,5	21.606,0	22.030	22.454,0
$\beta$	13,25	13,35	13,45	12,71	12,82	12,93
$\kappa$	0,44953	0,4852	0,52087	0,33829	0,3600	0,38171

Fonte: Do autor (2023).

Os parâmetros  $\beta$  estimados para o Equinócio de Outono e o Solstício de Inverno são estatisticamente semelhantes. No entanto, não há semelhança entre os demais parâmetros  $\beta$  (Figura 4.13).

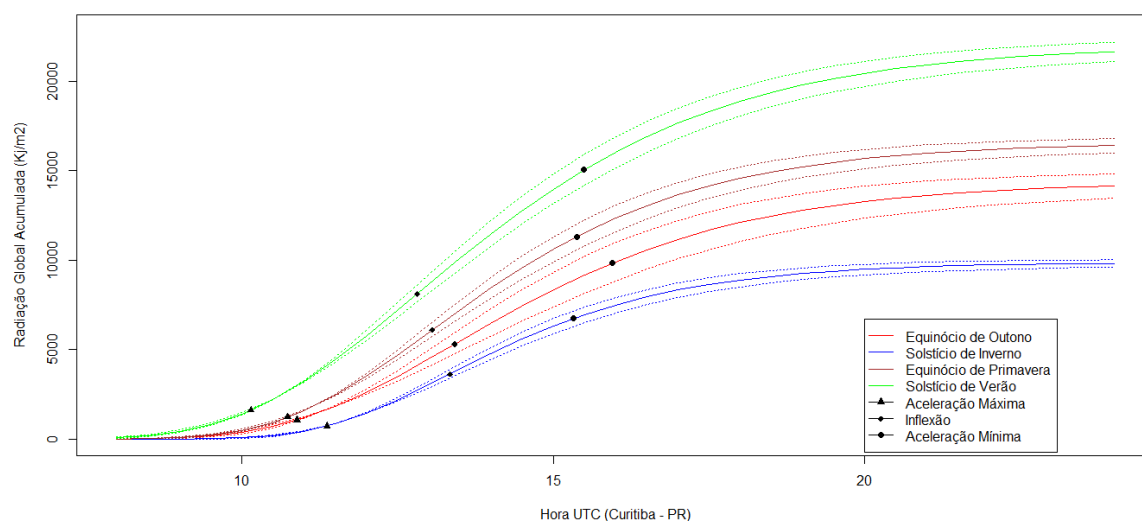
Figura 4.13 – Parâmetro  $\beta$  estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Gompertz ajustado ao dado de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Curitiba - PR; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.



Fonte: Do autor (2023).

Os valores assintóticos não são estatisticamente equivalentes (Figura 4.14). No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 10:89 UTC, com 1.051,15 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; o ponto de inflexão ocorre às 13:42 UTC, com 5.301,14 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; e a aceleração mínima ocorre às 15:95 UTC, com 9.835,09 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 11:37 UTC, com 719,83 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; o ponto de inflexão ocorre às 13:35 UTC, com 3.630,23 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; e a aceleração mínima ocorre às 15:33 UTC, com 6.735,09 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 10:74 UTC, com 1.208,72 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; o ponto de inflexão ocorre às 13:06 UTC, com 6.095,76 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; e a aceleração mínima ocorre às 15:38 UTC, com 11.309,33 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 10:15 UTC, com 1.607,00 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; o ponto de inflexão ocorre às 12:82 UTC, com 8.104,38 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; e a aceleração mínima ocorre às 15:49 UTC, com 15.035,88 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.14 – Modelo Gompertz ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, e irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Curitiba – PR.



Fonte: Do autor (2023).

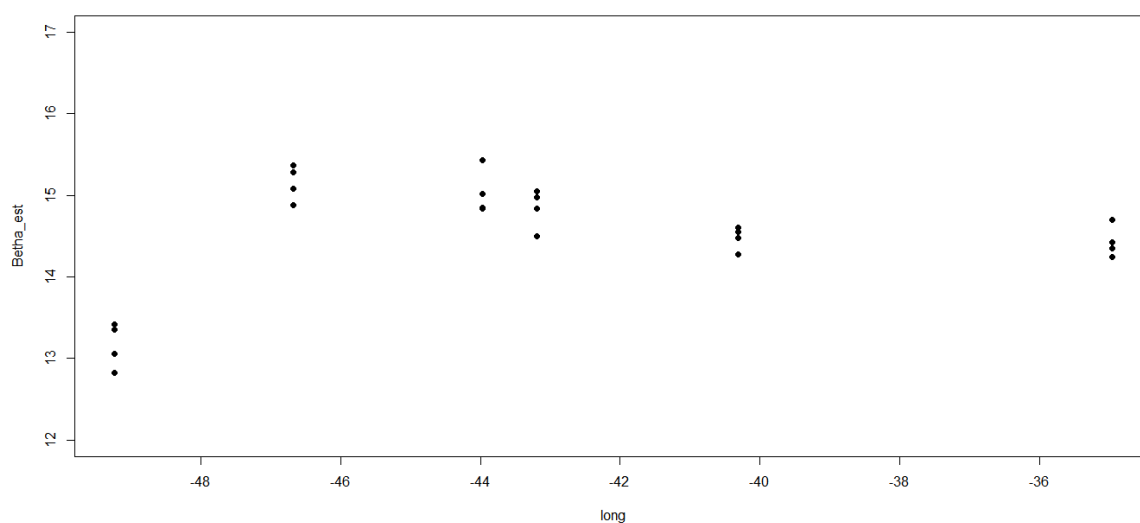
A estimativa do parâmetro  $\alpha$  ser mínima no Solstício de Inverno e máxima no Solstício de Verão é um resultado esperado. A estimativa do parâmetro  $\alpha$  nos Equinócios, assumindo valores próximos à média dos extremos, também é um resultado esperado. Comportamento semelhante foi verificado por Umlauf et al. (2018, p. 4), que obtiveram os

seguintes resultados de radiação solar incidente no estado do Paraná: mínima no inverno (119,2 MJ/m<sup>2</sup>) e máxima no verão (181,4 MJ/m<sup>2</sup>), com valores intermediários no outono (123,8 MJ/m<sup>2</sup>) e na primavera (176,2 MJ/m<sup>2</sup>).

#### 4.2.7 Associação entre os parâmetros $\beta$ estimados e as longitudes das cidades no Bioma Mata Atlântica

O parâmetro  $\beta$  representa a abscissa do ponto de inflexão. Espera-se que haja uma correlação entre esse parâmetro e a longitude, uma vez que a longitude está relacionada ao fuso horário. A correlação encontrada foi de -0,1562, indicando uma correlação negativa muito fraca (Figura 4.15).

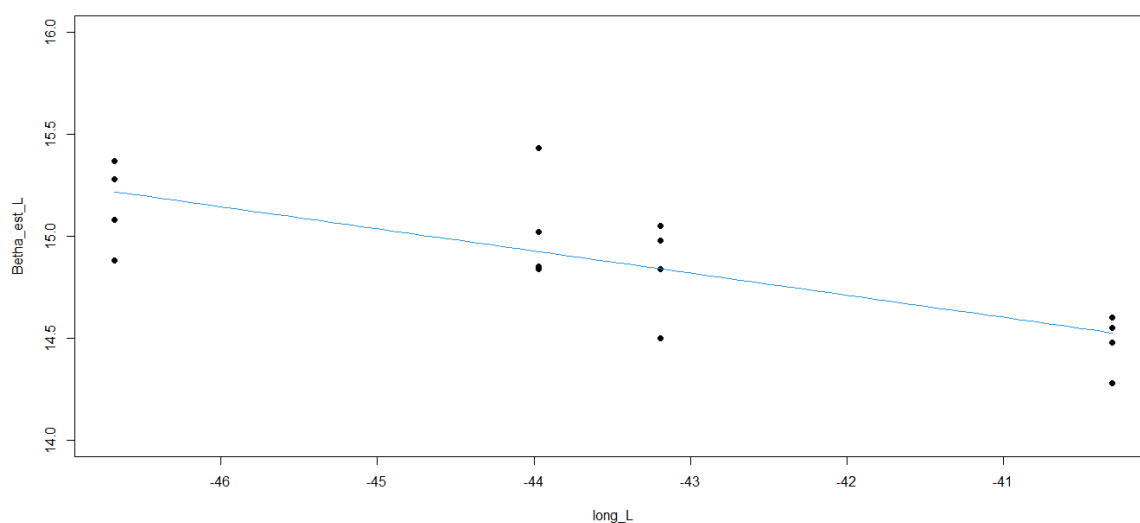
Figura 4.15 – Gráfico de dispersão dos parâmetros  $\beta$  estimados e longitude das cidades do Bioma Mata Atlântica.



Fonte: Do autor (2023).

O Modelo Gompertz translada o parâmetro  $\beta$  em aproximadamente -1 UTC (Tabela 4.4). A correlação entre os parâmetros  $\beta$  estimados, considerando apenas o Modelo Logístico, e a longitude das cidades é de -0,7654, indicando uma correlação negativa forte (Figura 4.16 e Tabela 4.12).

Figura 4.16 – Parâmetros  $\beta$  estimados pelo Modelo Logístico e as longitudes das cidades do Bioma Mata Atlântica.



Fonte: Do autor (2023).

Tabela 4.12 – Parâmetros da regressão linear do parâmetro  $\beta$  (em UTC) e da longitude (em graus) para o Modelo Logístico, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	9,09007	10,15299	11,21591
$A_1$	-0,13289	-0,10851	-0,08413

Fonte: Do autor (2023)

O modelo de regressão linear entre as longitudes (*long*) e os parâmetros  $\beta$  estimados para o Modelo Logístico foi ajustado para os dados das cidades de Belo Horizonte, Vitória, Rio de Janeiro e São Paulo:

$$\beta_L = 10,15299 - 0,10851 \cdot long \quad (4.1)$$

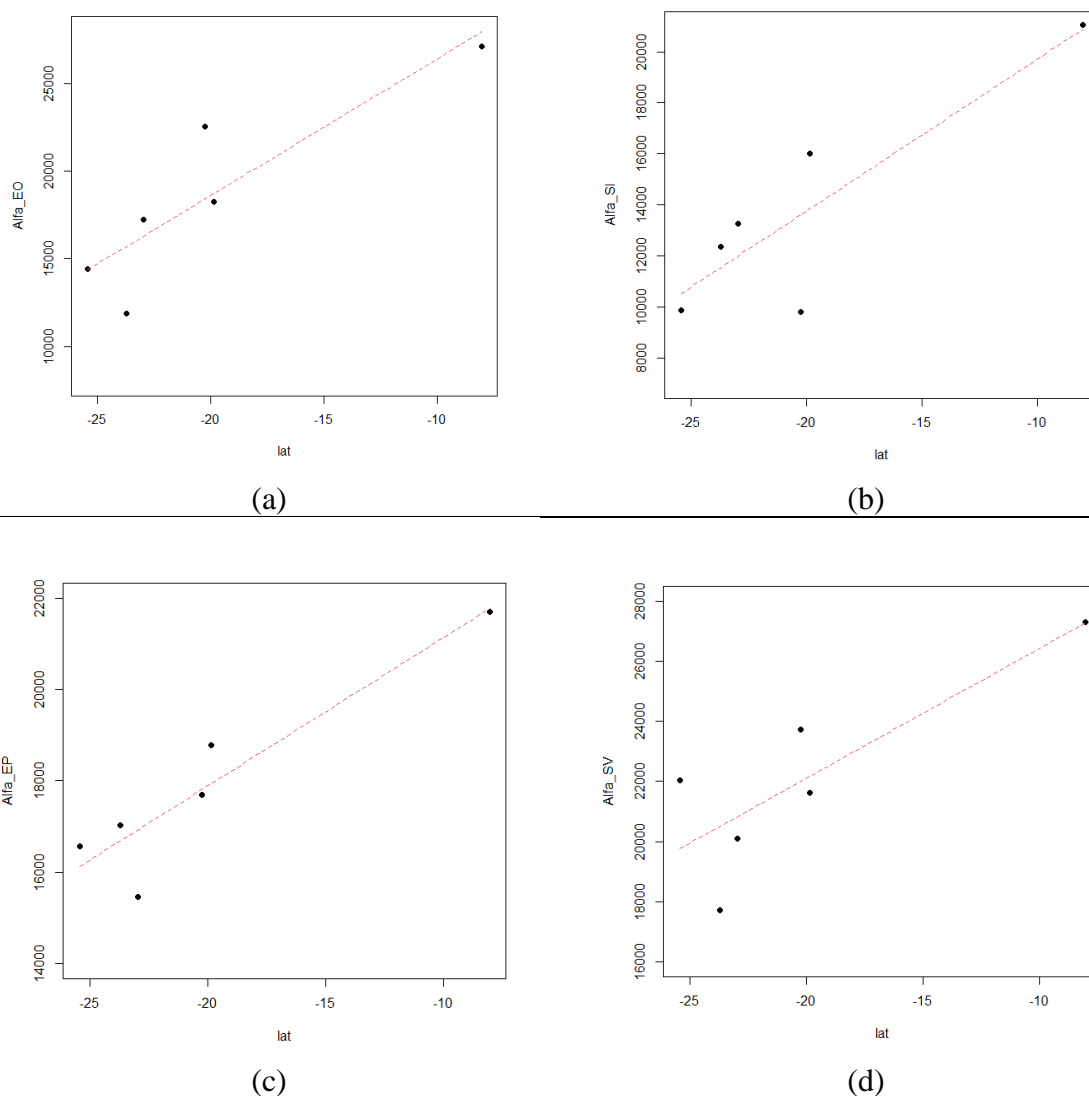
A função (4.1) permite calcular a abscissa do ponto de inflexão, o parâmetro  $\beta$ , para o Modelo Logístico das cidades localizadas no Bioma Mata Atlântica, entre as longitudes -46,680 e -40,310, com 95% de confiança.

#### 4.2.8 Associação entre os parâmetros $\alpha$ estimados e as latitudes das cidades no Bioma Mata Atlântica

Os gráficos de dispersão dos valores assintóticos e das latitudes estão representados na Figura 4.17. Os valores assintóticos do Equinócio de Outono estão representados na Figura 4.17 (a), com um coeficiente de correlação de 0,8378, indicando uma correlação positiva forte. Na Figura 4.17 (b), estão representados os valores assintóticos do Solstício de Inverno,

com um coeficiente de correlação de 0,8718, também indicando uma correlação positiva forte. Na Figura 4.17 (c), estão representados os valores assintóticos do Equinócio de Primavera, com um coeficiente de correlação de 0,9299, indicando uma correlação positiva muito forte. Na Figura 4.17 (d), estão representados os valores do Solstício de Verão, com uma correlação de 0,8274, indicando uma correlação positiva forte.

Figura 4.17 – Gráfico de dispersão das latitudes e dos valores dos parâmetros  $\alpha$  estimados (em  $\text{kJ}/\text{m}^2$ ), no Equinócio de Outono (a), Solstício de Inverno (b), Equinócio de Primavera (c) e Solstício de Verão (d), nas cidades localizadas no Bioma Mata Atlântica.



Fonte: Do autor (2023).

Tabela 4.13 – Parâmetros da regressão linear dos parâmetros  $\alpha$  estimados (em  $kJ/m^2$ ) e as latitudes (em graus) no Equinócio de Outono, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	29.903,0	34.208,3	38.513,6
$A_1$	573,4	779,8	986,2

Fonte: Do autor (2023)

A função (4.2) permite calcular o valor do parâmetro  $\alpha_{EO}$  no Equinócio de Outono, com 95% de confiança, para cidades localizadas no Bioma Mata Atlântica entre as latitudes ( $lat$ )  $-8,06^0$  e  $-25,4^0$ :

$$\alpha_{EO} = 34.208,3 + 779,8 \cdot lat \quad (4.2)$$

Tabela 4.14 – Parâmetros da regressão linear dos parâmetros  $\alpha$  estimados (em  $kJ/m^2$ ) e as latitudes (em graus) no Solstício de Inverno, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	22.179,8	25.666,1	29.152,4
$A_1$	427,7	594,9	762,1

Fonte: Do autor (2023)

A função (4.3) permite calcular o valor do parâmetro  $\alpha_{SI}$  no Solstício de Inverno, com 95% de confiança, para cidades localizadas no Bioma Mata Atlântica entre as latitudes ( $lat$ )  $-8,06^0$  e  $-25,4^0$ :

$$\alpha_{SI} = 25.666,1 + 594,9 \cdot lat \quad (4.3)$$

Tabela 4.15 – Parâmetros da regressão linear dos parâmetros  $\alpha$  estimados (em  $kJ/m^2$ ) e as latitudes (em graus) no Equinócio de Primavera, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	3.042,20	24.381,81	25.720,42
$A_1$	260,23	324,41	388,59

Fonte: Do autor (2023)

A função (4.4) permite calcular o valor do parâmetro  $\alpha_{EP}$  no Equinócio de Primavera, com 95% de confiança, para cidades localizadas no Bioma Mata Atlântica entre as latitudes ( $lat$ )  $-8,06^0$  e  $-25,4^0$ :

$$\alpha_{EP} = 24.381,81 + 324,41 \cdot lat \quad (4.4)$$

Tabela 4.16 – Parâmetros da regressão linear dos parâmetros  $\alpha$  estimados (em  $kJ/m^2$ ) e as latitudes (em graus) no Solstício de Verão, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	27.691,0	30.747,9	33.804,8
$A_1$	285,2	431,8	578,4

Fonte: Do autor (2023)

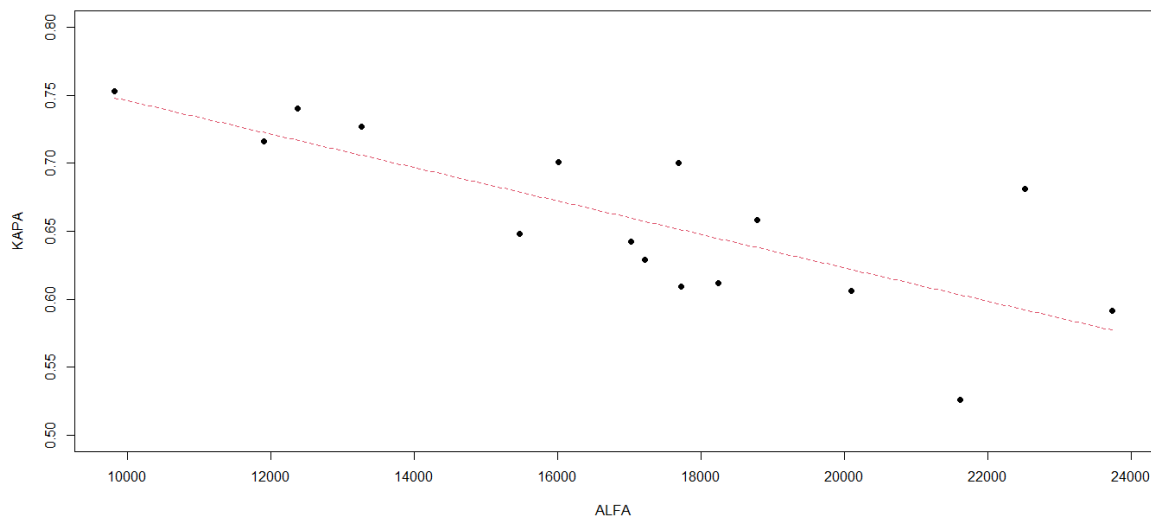
A função (4.5) permite calcular o valor do parâmetro  $\alpha_{SV}$  no Solstício de Verão; com 95% de confiança, para cidades localizadas no Bioma Mata Atlântica entre as latitudes ( $lat$ ) -  $8,06^0$  e  $-25,4^0$ :

$$\alpha_{SV} = 30.747,9 + 431,8 \cdot lat \quad (4.5)$$

#### 4.2.9 Associação entre os parâmetros estimados $\kappa$ e $\alpha$ estimados, pelo Modelo Logístico ajustado aos dados das cidades localizadas no Bioma Mata Atlântica

A correlação entre os parâmetros ajustados aos dados das seis cidades é de  $-0,5697$ , indicando uma correlação negativa moderada. Como o efeito do parâmetro  $\kappa$  é distinto nos modelos, optou-se por realizar a regressão utilizando os dados dos Modelos Logísticos. Os parâmetros foram ajustados para as cidades de Vitória, Belo Horizonte, Rio de Janeiro e São Paulo. O parâmetro  $\kappa$  está relacionado à velocidade de crescimento da função, ou seja, à taxa de variação do parâmetro  $\alpha$ . Nos modelos de acúmulo de irradiação solar global, o parâmetro  $\kappa$  é medido em  $UTC^{-1}$ . A correlação entre  $\kappa$  e  $\alpha$  é de  $-0,7689$ , uma correlação negativa forte (Figura 4.18), com os parâmetros da regressão linear apresentados na Tabela 4.17.

Figura 4.18 – Gráfico de dispersão dos parâmetros  $\kappa$  estimados e dos parâmetros  $\alpha$  estimados das cidades localizadas do Bioma Mata Atlântica, entre as latitudes  $-23,72^{\circ}$  e  $-19,91^{\circ}$ .



Fonte: Do autor (2023).

Tabela 4.17 – Parâmetros da regressão linear do parâmetro  $\kappa$  e do parâmetro  $\alpha$ , para Modelo Logístico, em cidades localizadas do Bioma Mata Atlântica entre as latitudes  $-23,72^{\circ}$  e  $-19,91^{\circ}$ , com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	0,82106	0,8689	0,91674
$A_1$	-0,000015022	-0,00001229	-0,000009558

Fonte: Do autor (2023).

A função (4.6) permite calcular parâmetro  $\kappa$  para o Modelo Logístico de cidade localizada no Bioma Mata Atlântica, entre as latitudes  $-23,72^{\circ}$  e  $-8,06^{\circ}$ , com 95% de confiança:

$$\kappa = 0,8689 - 0,00001229 \cdot \alpha \quad (4.6)$$

#### 4.2.10 Considerações sobre os ajustes no Bioma Mata Atlântica

O Modelo Logístico apresentou o melhor ajuste para os dados de irradiação global diária acumulada nas cidades de Belo Horizonte, Vitória, Rio de Janeiro e São Paulo, enquanto o Modelo Gompertz foi mais adequado para os dados das cidades de Recife e Curitiba. Não se observou um padrão na equivalência estatística entre os parâmetros  $\beta$  estimados.

A regressão entre os parâmetros  $\beta$  e as longitudes mostrou uma correlação negativa forte para cidades localizadas entre as longitudes  $-46,680$  e  $-34,960$ . Já a regressão entre os

parâmetros  $\alpha$  e as latitudes apresentou uma correlação positiva forte para cidades localizadas entre as latitudes -25,40 e -8,060. Por fim, a regressão entre os parâmetros  $\kappa$  e  $\alpha$  revelou uma correlação negativa forte para cidades localizadas entre as latitudes -23,720 e -19,910.

### 4.3 Cidades do Bioma Amazônia

No Bioma Amazônia, foram estudados os dados das cidades de Macapá – AP, Manaus – AM, Humaitá – AM e Rio Branco – AC, dispostas em ordem decrescente de latitude.

#### 4.3.1 Macapá - AP

Os dados de Macapá foram ajustados utilizando o Modelo Logístico. Para o Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 16.300 kJ/m<sup>2</sup>, com a abscissa do ponto de inflexão em 15,27 UTC (12:16 BRT) e  $\kappa$  de 0,6760 UTC<sup>-1</sup>. Para o Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 18.960 kJ/m<sup>2</sup>, com a abscissa do ponto de inflexão em 15,32 UTC (12:19 BRT) e  $\kappa$  de 0,7040 UTC<sup>-1</sup>. Para o Equinócio de Primavera, o modelo estimou um valor assintótico de 25.870 kJ/m<sup>2</sup>, com a abscissa do ponto de inflexão em 15,33 UTC (12:20 BRT) e  $\kappa$  de 0,6381 UTC<sup>-1</sup>. Para o Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 20.310 kJ/m<sup>2</sup>, com a abscissa do ponto de inflexão em 15,37 UTC (12:22 BRT) e  $\kappa$  de 0,6590 UTC<sup>-1</sup> (Tabela 4.18).

Tabela 4.18 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Macapá – AP, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	16.113,9	16.300	16.486,1	25.535,4	25.870	26.204,6
$\beta$	15,18	15,27	15,36	15,23	15,33	15,43
$\kappa$	0,64233	0,6760	0,70967	0,60392	0,6381	0,67228

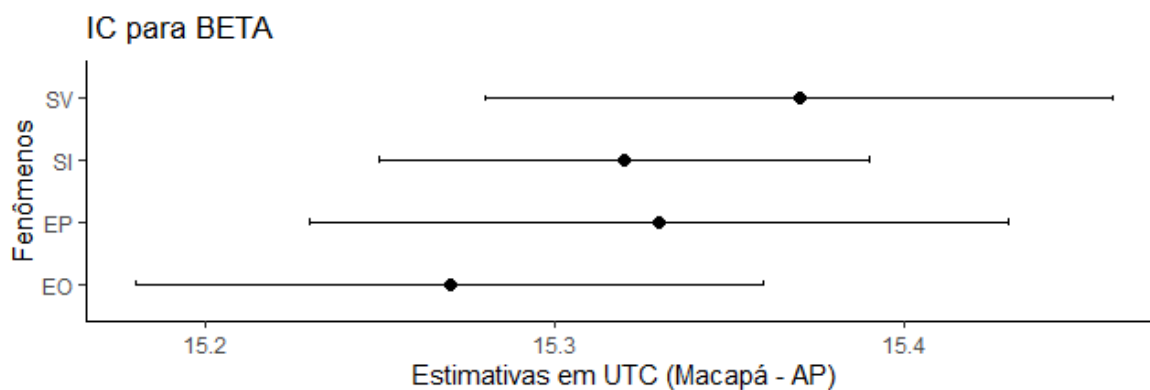
Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	18.795,1	18.960	19.124,9	20.075,9	20.310	20.544,1
$\beta$	15,25	15,32	15,39	15,28	15,37	15,46
$\kappa$	0,67658	0,7040	0,73142	0,62681	0,6590	0,69119

Fonte: Do autor (2023)

Durante o período menos chuvoso em Macapá, há uma menor taxa de nebulosidade em comparação com o período chuvoso. Nos meses chuvosos, há mais radiação global difusa, provavelmente devido à nebulosidade e aos aerossóis presentes na atmosfera, resultantes das altas temperaturas, que podem atingir até 36°C, e da velocidade do vento, que pode alcançar até 3,7 m/s. Existe uma forte relação entre os elementos meteorológicos estudados e a intensidade da radiação global (BELÚCIO et al., 2014). A quantidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre é menor no período chuvoso e maior no período menos chuvoso. Segundo Belúcio et al. (2014, p. 498), a radiação solar extraterrestre em Macapá, de 2006 a 2012, foi de 36,8 MJ/m<sup>2</sup> no período chuvoso (janeiro a junho) e de 37,3 MJ/m<sup>2</sup> no período seco (julho a dezembro). A pequena variação desses valores se deve à proximidade do local de estudo com a linha do Equador. As conclusões desses pesquisadores confirmam as características dos resultados dos parâmetros  $\alpha$  estimados pelo ajuste do Modelo Logístico aos dados de Macapá.

Os parâmetros  $\beta$  estimados pelo Modelo Logístico são estatisticamente equivalentes (Figura 4.19), um resultado esperado.

Figura 4.19 – Parâmetro  $\beta$  e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Macapá – AP. SV: Solstício de Verão, SI: Solstício de Inverno, EP: Equinócio de Primavera, EO: Equinócio de Outono.

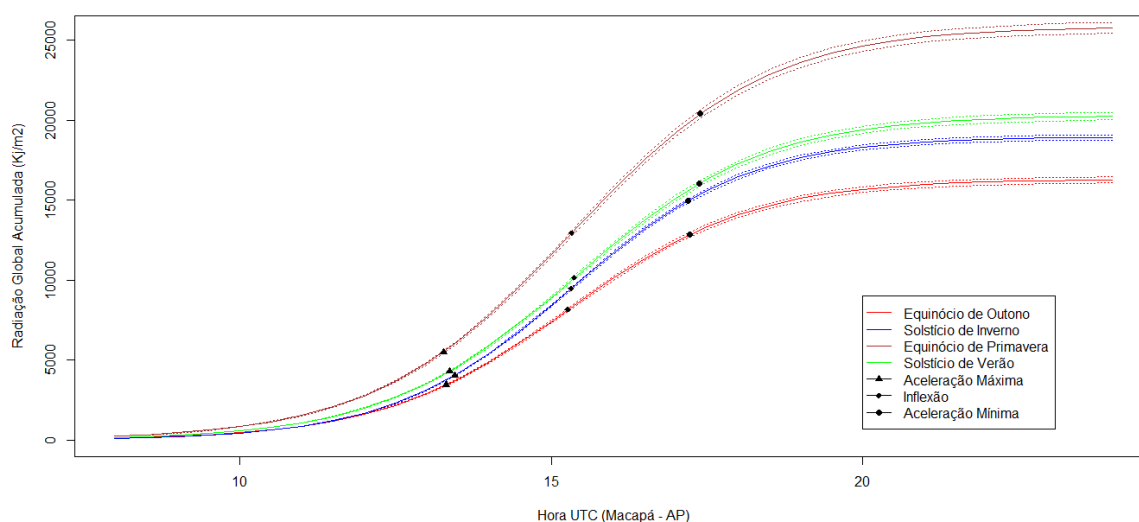


Fonte: Do autor (2023).

Os valores assintóticos, no entanto, não são estatisticamente equivalentes (Figura 4.20). No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 13:32 UTC, com 3.444,60 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17:22 UTC, com 12.855,40 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 13:45 UTC, com 4.006,72 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17:19 UTC, com 14.953,28 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração

máxima ocorre às 13:27 UTC, com 5.466,97 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17:39 UTC, com 20.403,03 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 13:37 UTC, com 4.292,01 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17:37 UTC, com 16.017,99 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.20 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Macapá – AP.



Fonte: Do autor (2023)

O fato de o valor mínimo do parâmetro  $\alpha$  ocorrer no Equinócio de Outono não é um resultado esperado, assim como o valor máximo ocorrer no Equinócio de Primavera. Comportamentos semelhantes foram identificados em estudos sobre insolação e radiação na cidade de Macapá. No estudo da insolação, referente ao número de horas de brilho solar efetivo, BELÚCIO et al. (2014, p. 498) registraram um mínimo de 114 horas em março e um máximo de 285 horas em outubro, aproximadamente, 210 horas em junho e 215 horas em dezembro. Ao estudar a radiação solar em Wh/m<sup>2</sup>/dia, Marques et al. (2012, p. 137) obtiveram um mínimo de 3900 Wh/m<sup>2</sup>/dia em março e um máximo de 6400 Wh/m<sup>2</sup>/dia em setembro, com 4500 Wh/m<sup>2</sup>/dia em junho e 4600 Wh/m<sup>2</sup>/dia em dezembro.

#### 4.3.2 Manaus – AM

O clima de Manaus é típico da Amazônia Central, caracterizado por temperaturas elevadas, abundância de chuvas ao longo do ano e uma curta estação seca. A umidade relativa

média mensal é sempre superior a 80%, e a precipitação apresenta um comportamento sazonal. Os índices pluviométricos médios mensais são superiores a 150 mm em pelo menos nove meses do ano (entre outubro e junho), com apenas três meses registrando valores inferiores (julho a setembro), sendo o menor índice observado no mês de agosto (99 mm). "As temperaturas médias mensais variaram entre 25,2 °C (julho) e 26,7 °C (novembro). As máximas oscilaram entre 31,3 °C em fevereiro e 33,2 °C em setembro, enquanto as mínimas estiveram entre 21,5 °C em julho e 23,0 °C em março" (MARQUES FILHO, DALLAROSA, PACHÊCO, 2005).

A ocorrência de valores extremos de temperatura nos meses secos, tanto máximos quanto mínimos, pode ser explicada pela baixa nebulosidade da estação, que permite uma maior quantidade de radiação solar atingir a superfície durante o dia e uma maior perda radiativa durante a noite (MARQUES FILHO, DALLAROSA, PACHÊCO, 2005). Segundo Ribeiro et al. (1982, p. 346), os valores médios de radiação solar global de maior intensidade ocorrem nos meses de setembro e outubro, enquanto os menores valores são registrados em dezembro, janeiro e fevereiro. Esse comportamento foi confirmado pelos parâmetros  $\alpha$  dos modelos ajustados, que indicaram o maior valor no equinócio de primavera e o menor valor no solstício de verão, conforme mostrado na Tabela 4.19 e na Figura 4.22.

Os dados da cidade de Manaus foram ajustados com o Modelo Gompertz. No ajuste para o Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 15.130 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão em 14,42 UTC (11:25 BRT) e  $\kappa$  de 0,4448 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 16.730 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão em 15,11 UTC (12:07 BRT) e  $\kappa$  de 0,4203 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Equinócio de Primavera, o modelo estimou um valor assintótico de 19.350 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão em 14,42 UTC (11:25 BRT) e  $\kappa$  de 0,4160 UTC<sup>-1</sup>. Já no ajuste para o Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 7.472 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão em 13,87 UTC (10:52 BRT) e  $\kappa$  de 0,4418 UTC<sup>-1</sup>, conforme mostrado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Manaus – AM, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	14.993,1	15.130	15.266,9	19.050,6	19.350	19.649,4
$\beta$	14,37	14,42	14,47	14,33	14,42	14,51
$\kappa$	0,4289	0,4448	0,4607	0,3921	0,4160	0,4399

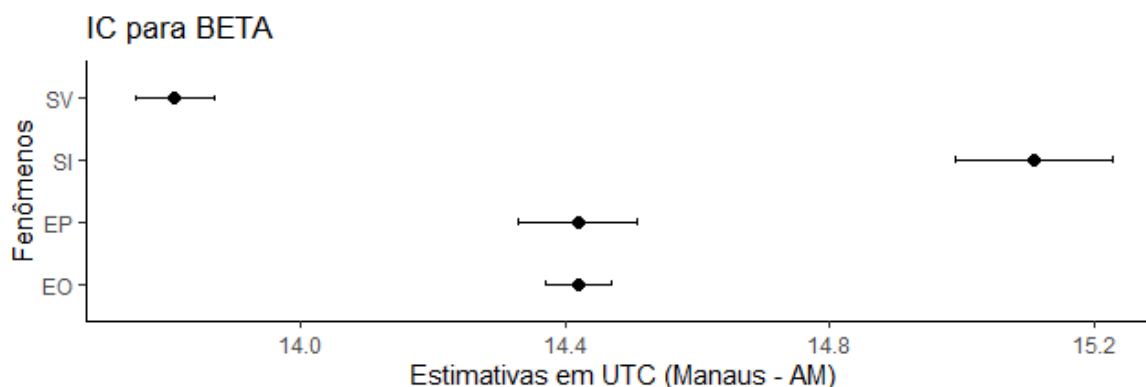
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	16.370,6	16.730	17.089,4	7.403,97	7.472	7.540,03
$\beta$	14,99	15,11	15,23	13,75	13,81	13,87
$\kappa$	0,38842	0,4203	0,45218	0,42491	0,4418	0,45871

Fonte: Do autor (2023).

Os parâmetros  $\beta$  estimados para os equinócios são estatisticamente equivalentes; entretanto, os parâmetros  $\beta$  estimados para os solstícios não apresentam equivalência, conforme ilustrado na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Parâmetro  $\beta$  estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Manaus – AM, em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.

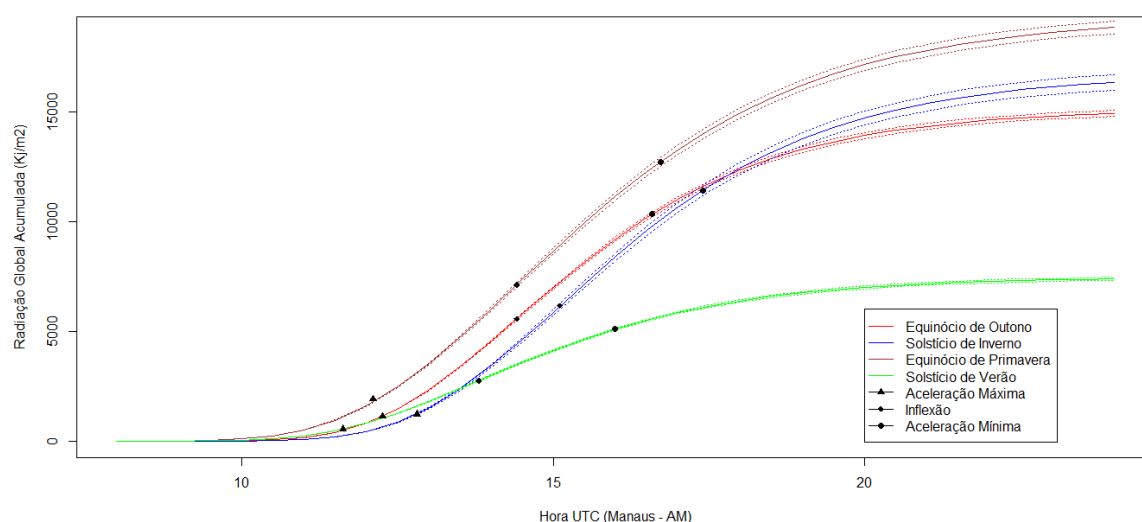


Fonte: Do autor (2023)

Os valores assintóticos não são estatisticamente equivalentes, conforme mostrado na Figura 4.22. No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 12,26 UTC, com 1.103,68 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; o ponto de inflexão ocorre às 14,42 UTC, com 5.566,02 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; e a aceleração mínima ocorre às 16,58 UTC, com 10.326,50 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 12,82 UTC, com 1.220,39 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; o ponto de inflexão ocorre às 15,11

UTC, com 5.154,62 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; e a aceleração mínima ocorre às 17,40 UTC, com 11.418,53 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 12,11 UTC, com 1.411,51 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; o ponto de inflexão ocorre às 14,42 UTC, com 7.118,47 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; e a aceleração mínima ocorre às 16,73 UTC, com 13.206,73 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 11,63 UTC, com 545,05 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; o ponto de inflexão ocorre às 13,81 UTC, com 2.748,80 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada; e a aceleração mínima ocorre às 15,99 UTC, com 5.099,78 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.22 – Modelo Gompertz ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Manaus – AM.



Fonte: Do autor (2023).

O fato de o parâmetro assintótico estimado ser mínimo no Solstício de Verão e máximo no Equinócio de Primavera não era esperado. Villa Nova et al. (1978, p. 420), ao estudar a irradiação solar em Manaus, obtiveram para a radiação global um valor mínimo de 336 cal/cm<sup>2</sup>.dia em março, e máximos de 559 cal/cm<sup>2</sup>.dia em setembro, 380 cal/cm<sup>2</sup>.dia em dezembro e 422 cal/cm<sup>2</sup>.dia em junho. Em estudo semelhante, Ribeiro et al. (1982, p. 341-343) registraram o valor máximo em setembro (486 cal/cm<sup>2</sup>.dia), com valores de 305 cal/cm<sup>2</sup>.dia em março, 432 cal/cm<sup>2</sup>.dia em junho e 363 cal/cm<sup>2</sup>.dia em dezembro.

### 4.3.3 Humaitá - AM

Segundo Martins et al. (2014, p. 96), nos meses do período seco há maior claridade atmosférica, enquanto nos meses do período chuvoso ocorrem os menores índices de claridade. Durante todo o ano, no período matutino, predomina o céu parcialmente nublado, sendo que, em 2012, o céu permaneceu parcialmente nublado praticamente todos os dias. Esses fatores interferem na intensidade da irradiação global ao nível do solo.

No estudo da série histórica de 2009 a 2016, na cidade de Humaitá, a radiação solar apresentou média e desvio padrão para o mês de março de  $(4,4222 \pm 0,3770)$  kWh/m<sup>2</sup>; para o mês de junho de  $(3,6968 \pm 0,7715)$  kWh/m<sup>2</sup>; para o mês de setembro de  $(4,3682 \pm 1,0675)$  kWh/m<sup>2</sup> e para o mês de dezembro de  $(4,2950 \pm 0,4024)$  kWh/m<sup>2</sup> (ALVES; REIS; GOIS, 2018). Os ajustes dos dados de irradiação solar global mostraram semelhança com este estudo, pois os valores estimados dos parâmetros  $\alpha$  nos solstícios são estatisticamente semelhantes, assim como os parâmetros do solstício de verão e do equinócio de primavera (Tabela 4.16).

O modelo Gompertz foi o que melhor se ajustou aos dados da cidade de Humaitá. No ajuste do equinócio de outono, o modelo estimou o valor assintótico de 14.200 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão de 14,96 UTC (11:58 BRT) e  $\kappa$  de 0,4045 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste do solstício de inverno, o modelo estimou o valor assintótico de 15.920 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão de 15,03 UTC (12:02 BRT) e  $\kappa$  de 0,3883 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste do equinócio de primavera, o modelo estimou o valor assintótico de 14.930 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão de 15,04 UTC (12:02 BRT) e  $\kappa$  de 0,3780 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste do solstício de verão, o modelo estimou o valor assintótico de 15.400 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão de 15,70 UTC (12:42 BRT) e  $\kappa$  de 0,3522 UTC<sup>-1</sup> (Tabela 4.20).

Tabela 4.20 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Humaitá – AM, intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	13.965,6	14.200	14.434,4			
$\beta$	14,87	14,96	15,05			
$\kappa$	0,38142	0,4045	0,42758			

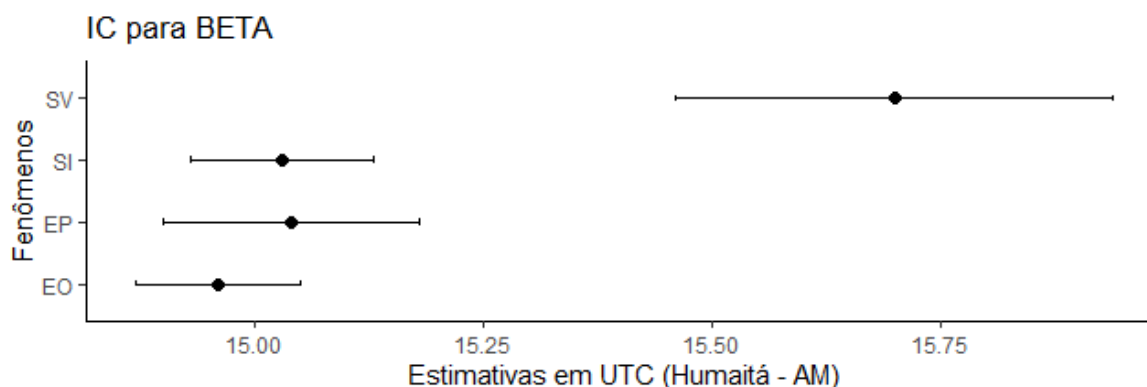
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	15.631,5	15.920	16.208,5	14.550,3	14.930	15.309,7
$\beta$	14,93	15,03	15,13	14,90	15,04	15,18
$\kappa$	0,36504	0,3883	0,41156	0,34706	0,3780	0,40894

Fonte: Do autor (2023)

Os parâmetros  $\beta$  estimados para os equinócios e para o Solstício de Verão são estatisticamente equivalentes; contudo, não há equivalência entre o parâmetro  $\beta$  estimado para o Solstício de Verão e os demais (Figura 4.23).

Figura 4.23 – Parâmetro  $\beta$  estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Humaitá – AM; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.

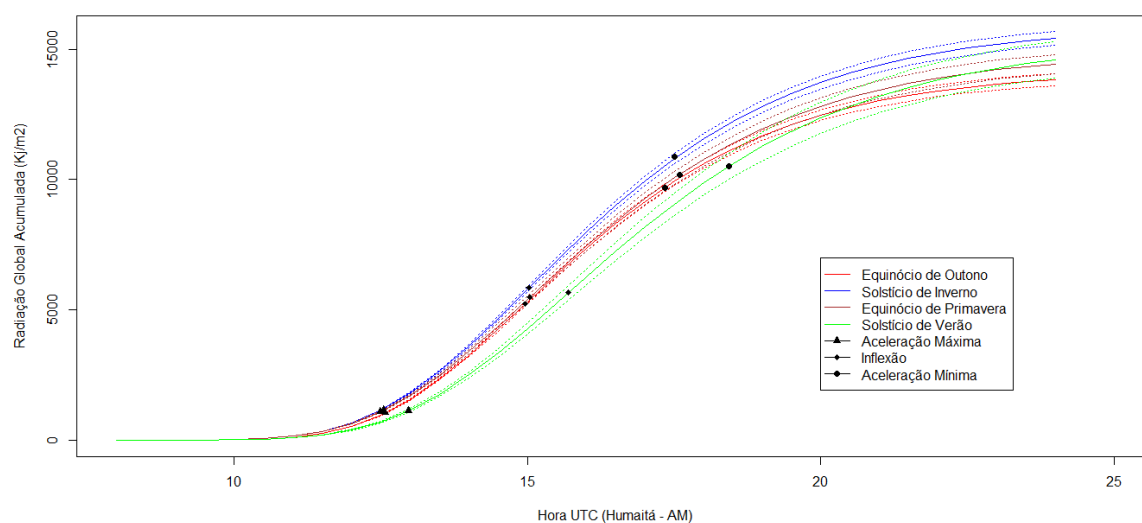


Fonte: Do autor (2023).

O valor assintótico do Solstício de Verão é estatisticamente equivalente aos demais, assim como os valores assintóticos dos equinócios são estatisticamente semelhantes (Figura 4.24). No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 12,58 UTC, com 1.035,84 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, o ponto de inflexão ocorre às 14,96 UTC, com 5.223,89 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,34 UTC, com 9.691,76 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 12,55 UTC, com

1.161,30 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, o ponto de inflexão ocorre às 15,03 UTC, com 5.856,64 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,59 UTC, com 10.865,69 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 12,49 UTC, com 1.089,09 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, o ponto de inflexão ocorre às 15,04 UTC, com 5.492,44 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,59 UTC, com 10.190,00 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 12,97 UTC, com 1.123,37 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, o ponto de inflexão ocorre às 15,70 UTC, com 5.665,34 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 18,43 UTC, com 10.510,78 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.24 – Modelo Gompertz ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Humaitá – AM.



Fonte: Do autor (2023)

Os parâmetros assintóticos estimados nos solstícios são estatisticamente semelhantes, assim como os parâmetros do Solstício de Verão e do Equinócio de Primavera. O parâmetro  $\alpha$  estimado apresenta o valor máximo no Solstício de Inverno e o mínimo no Equinócio de Outono. Macedo e Fisch (2018, p. 355) obtiveram resultados semelhantes, com valores máximos na ordem de 20 MJm<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup> na estação seca e valores mínimos na ordem de 15 MJm<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup> na estação chuvosa, em conformidade com a climatologia da região.

#### 4.3.4 Rio Branco – AC

O Estado do Acre possui dois principais tipos de clima: tropical úmido e tropical de monções. O clima tropical úmido é caracterizado por intensa precipitação pluvial, com acumulados anuais superiores a 2.000 mm. Independentemente do mês, a precipitação mensal é superior a 60 mm, e não há um período seco bem definido. Este tipo de clima é típico de regiões próximas à linha do Equador. Já o clima tropical de monções, predominante no restante do estado, apresenta características similares ao tropical úmido em termos de quantidade de precipitação, mas com um período seco de 1 a 3 meses, em que a precipitação mensal é inferior a 60 mm (DELGADO et al., 2014).

Localizada na região leste do estado, a cidade de Rio Branco possui clima tropical úmido. O valor médio diário mensal de insolação PYR, em MJ/m<sup>2</sup>/dia, no período de 2000 a 2005, foi de 15 em março, 16 em junho, 18 em setembro e 20 em dezembro (DUARTE, 2006). Segundo Delgado et al. (2014, p. 422), de 1970 a 1999, o valor máximo de irradiação no período seco (abril - setembro) foi de 17,67 MJ/m<sup>2</sup>/dia, e no período chuvoso (outubro - março) foi de 17,94 MJ/m<sup>2</sup>/dia. Os valores do parâmetro  $\alpha$  estimados para os eventos de equinócios e solstícios apresentaram resultados similares aos apresentados pelos autores mencionados, conforme a Tabela 4.21 e a Figura 4.26.

O Modelo Logístico foi o que melhor se ajustou aos dados de Rio Branco. No ajuste do Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 14.460 kJ/m<sup>2</sup>, com abscissa do ponto de inflexão em 16,25 UTC (13:15 BRT) e  $\kappa$  de 0,7512 UTC<sup>-1</sup>. No Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 17.840 kJ/m<sup>2</sup>, com abscissa do ponto de inflexão em 16,33 UTC (13:20 BRT) e  $\kappa$  de 0,6771 UTC<sup>-1</sup>. Para o Equinócio de Primavera, o valor assintótico estimado foi de 16.150 kJ/m<sup>2</sup>, com abscissa do ponto de inflexão em 16,46 UTC (13:28 BRT) e  $\kappa$  de 0,6123 UTC<sup>-1</sup>. No Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 16.980 kJ/m<sup>2</sup>, com abscissa do ponto de inflexão em 16,88 UTC (13:53 BRT) e  $\kappa$  de 0,6292 UTC<sup>-1</sup> (Tabela 4.21).

Tabela 4.21 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Rio Branco – AC, intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	14.335,4	14.460	14.584,6	15.812,7	16.150	16.487,3
$\beta$	16,19	16,25	16,31	16,31	16,46	16,61
$\kappa$	0,72289	0,7512	0,77951	0,56634	0,6123	0,65826

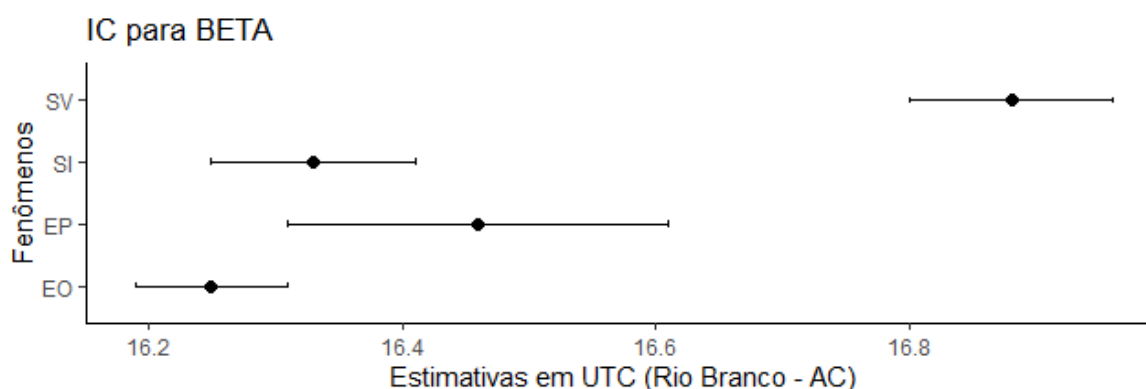
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	17.636,5	17.840	18.043,5	16.789,0	16.980	17.171,0
$\beta$	16,25	16,33	16,41	16,80	16,88	16,96
$\kappa$	0,64638	0,6771	0,70782	0,60430	0,62920	0,65410

Fonte: Do autor (2023)

Os parâmetros  $\beta$  estimados para os Equinócios e o Solstício de Inverno são estatisticamente equivalentes, assim como são equivalentes os parâmetros do Equinócio de Primavera e do Solstício de Inverno. O parâmetro  $\beta$  estimado para o Solstício de Verão, no entanto, não possui equivalente com os demais, conforme ilustrado na Figura 4.25.

Figura 4.25 – Estimativa do parâmetro  $\beta$  e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Rio Branco – AC; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.

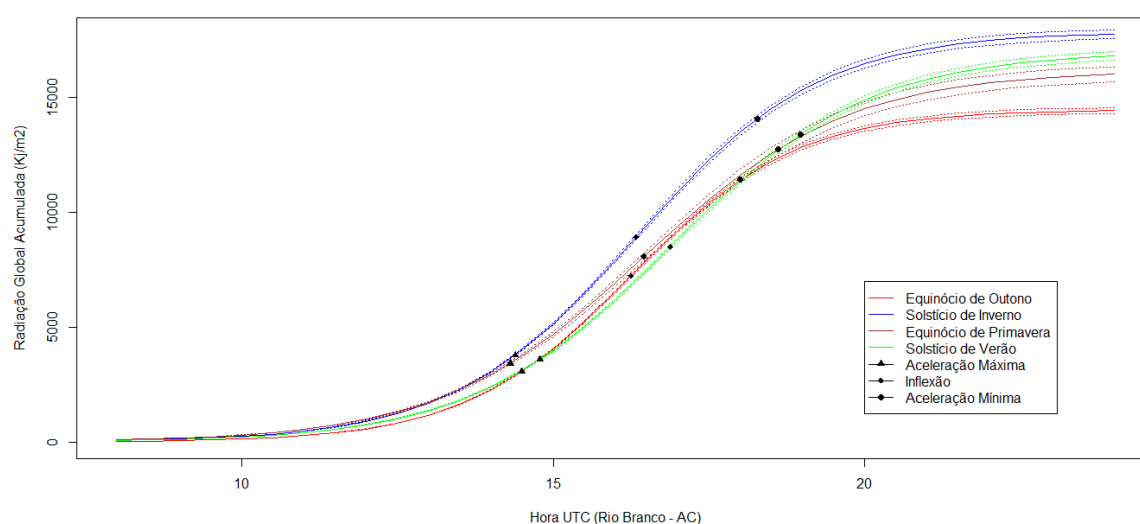


Fonte: Do autor (2023)

Os valores assintóticos estimados não são estatisticamente equivalentes, conforme mostrado na Figura 4.26. No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 14:50 UTC, com 3.055,76 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 18:00 UTC, com 11.404,24 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 14:39 UTC, com 3.770,04 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima

ocorre às 18:27 UTC, com 14.069,96 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 14:31 UTC, com 3.412,90 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 18:61 UTC, com 12.737,10 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 14:79 UTC, com 3.588,30 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 18:97 UTC, com 13.391,70 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.26 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Rio Branco – AC.



Fonte: Do autor (2023)

O parâmetro  $\alpha$  atinge seu valor máximo no Solstício de Inverno, o que, segundo Duarte (2006, p. 317), ocorre devido à escassez de nebulosidade, permitindo que a insolação e a irradiação ao meio-dia alcancem valores máximos em julho, período da seca.

#### 4.3.5 Considerações sobre os ajustes no Bioma Amazônia

O Modelo Logístico foi o que melhor se ajustou aos dados das cidades de Macapá – AP e Rio Branco – AC, enquanto o Modelo Gompertz apresentou melhor ajuste aos dados de Manaus – AM e Humaitá – AM. O parâmetro  $\alpha$  estimado alcança seus valores máximos no Equinócio de Primavera em Macapá e Manaus, e no Solstício de Inverno em Humaitá e Rio Branco. A estimativa do valor assintótico é mínima no Equinócio de Outono em Manaus, Humaitá e Rio Branco.

## 4.4 Cidades do Bioma Cerrado

As cidades estudadas no Bioma Cerrado foram São Luís – MA, Brasília – DF e Campo Grande – MS, organizadas em ordem decrescente de latitude. A análise dos dados da cidade São Luís foi realizada no item 4.1.

### 4.4.1 Brasília – DF

Ao modelar a radiação solar global em relação aos valores extremos da temperatura do ar diária em 10 localidades do estado de Goiás, Fernandes (2018, p. 561) identificou que a variação da amplitude térmica é menor nos meses úmidos (outubro a março) e maior no período seco. Durante o período seco, a ausência de nuvens à noite favorece a perda de energia térmica, resultando em maiores amplitudes térmicas. Essas condições atmosféricas justificam os valores estimados do parâmetro  $\alpha$  na Tabela 4.18.

O Modelo Logístico apresentou o melhor ajuste para os dados da cidade de Brasília. No ajuste referente ao Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 21.750 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 15,22 UTC (12:13 BRT) e um  $\kappa$  de 0,6496 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste referente ao Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 19.300 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 15,39 UTC (12:23 BRT) e um  $\kappa$  de 0,6672 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste referente ao Equinócio de Primavera, o modelo estimou um valor assintótico de 18.470 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 15,13 UTC (12:08 BRT) e um  $\kappa$  de 0,6690 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste referente ao Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 19.650 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 14,91 UTC (11:55 BRT) e um  $\kappa$  de 0,6347 UTC<sup>-1</sup>, conforme apresentado na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Brasília – DF, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	21.496,8	21.750	22.003,2	18.219,6	18.470	18.720,4
$\beta$	14,32	15,22	16,12	15,04	15,13	15,22
$\kappa$	0,61754	0,6496	0,68166	0,63625	0,6690	0,70175

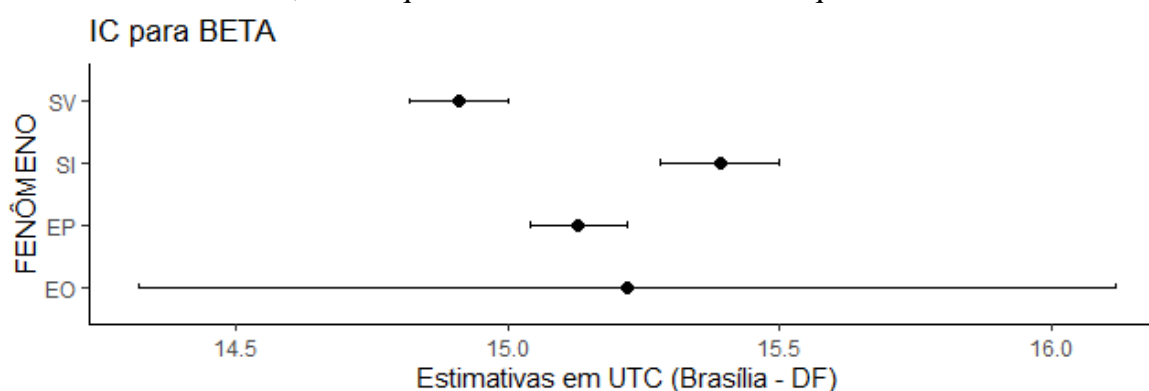
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	18.965,3	19.300	19.634,7	19.426,4	19.650	19.873,6
$\beta$	15,28	15,39	15,50	14,82	14,91	15,00
$\kappa$	0,62672	0,6672	0,70768	0,60386	0,6347	0,66554

Fonte: Do autor (2023)

O parâmetro  $\beta$  estimado para o Equinócio de Outono é estatisticamente equivalente aos demais valores de  $\beta$ . No entanto, os parâmetros  $\beta$  estimados para o Equinócio de Primavera e os Solstícios não são estatisticamente equivalentes, conforme mostrado na Figura 4.27.

Figura 4.27 – Estimativa do parâmetro  $\beta$  e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Brasília – DF; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.

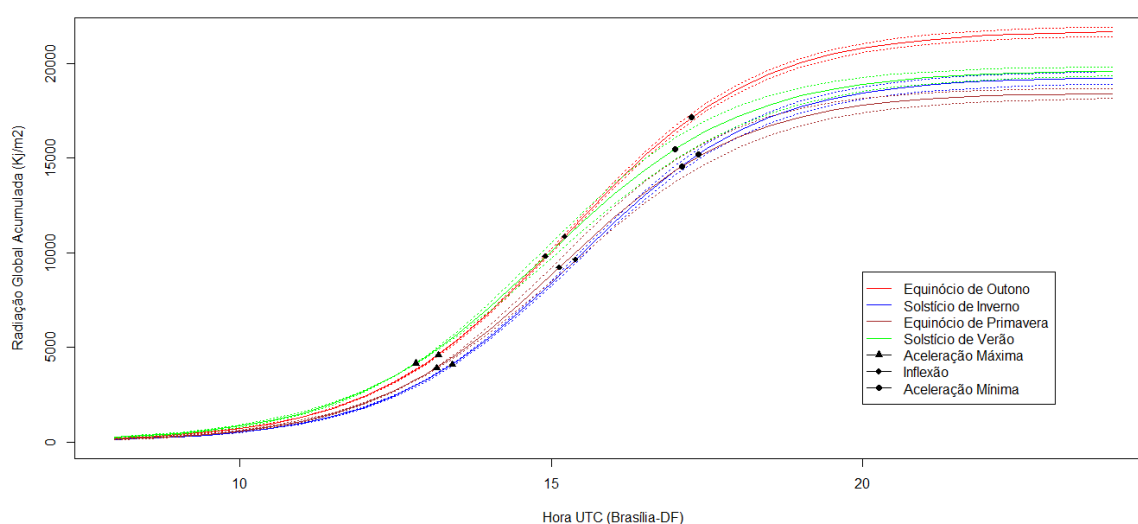


Fonte: Do autor (2023)

Os valores assintóticos não são estatisticamente equivalentes, conforme ilustrado na Figura 4.28. No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 13,19 UTC com 4.596,32 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,25 UTC com 17.153,68 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 13,42 UTC com 4.078,57 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às

17,36 UTC com 15.221,43 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 13,16 UTC com 3.903,17 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,10 UTC com 14.566,83 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 12,84 UTC com 4.152,53 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,98 UTC com 15.497,47 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.28 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Brasília – DF.



Fonte: Do autor (2023)

Os maiores valores do parâmetro  $\alpha$  ocorreram no Equinócio de Outono e no Solstício de Inverno, enquanto os menores valores foram observados no Solstício de Verão e no Equinócio de Primavera, o que se justifica pelas condições atmosféricas dos períodos seco e chuvoso. Ao estudar a radiação solar e a evapotranspiração, Dornelas, Silva e Oliveira (2006, p. 1215) obtiveram os seguintes valores de irradiação solar global, em MJ/m<sup>2</sup>/dia: março ( $18,93 \pm 5,08$ ), junho ( $18,35 \pm 3,43$ ), setembro ( $19,81 \pm 5,69$ ) e dezembro ( $18,40 \pm 5,13$ ).

#### 4.4.2 Campo Grande – MS

No Mato Grosso do Sul predomina o clima tropical e tropical de altitude, com chuvas de verão e inverno seco, caracterizado por médias térmicas de 25°C na Baixada do Paraguai e 24°C no planalto. As principais variações climatológicas são influenciadas pelas massas

Tropicais Atlântica, Tropical Continental e Polar Atlântica. As maiores temperaturas são observadas entre os meses de outubro e março, sendo que as médias mais elevadas ocorrem em outubro, devido à transição entre o período seco e o chuvoso. A radiação solar em Campo Grande, no ano de 2017, em MJ/m<sup>2</sup>, foi de 19,37 em março, 13,92 em junho, 20,69 em setembro e 18,68 em dezembro (OLIVEIRA; CAVAZZANA; SOUZA, 2019). No ajuste dos dados de irradiação solar global acumulada da cidade de Campo Grande, os modelos apresentaram a mesma ordenação do parâmetro  $\alpha$  em ordem crescente: solstício de inverno, equinócio de outono, solstício de verão e equinócio de primavera, conforme a Tabela 4.23 e a Figura 4.30.

O Modelo Logístico foi o que melhor se ajustou aos dados de Campo Grande. No ajuste para o Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 17.050 kJ/m<sup>2</sup>, com a abscissa do ponto de inflexão em 16,08 UTC (13:05 BRT) e  $\kappa$  de 0,5697 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 15.470 kJ/m<sup>2</sup>, com a abscissa do ponto de inflexão em 15,79 UTC (12:47 BRT) e  $\kappa$  de 0,7030 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Equinócio de Primavera, o modelo estimou um valor assintótico de 23.530 kJ/m<sup>2</sup>, com a abscissa do ponto de inflexão em 15,62 UTC (12:37 BRT) e  $\kappa$  de 0,6335 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 19.490 kJ/m<sup>2</sup>, com a abscissa do ponto de inflexão em 15,58 UTC (12:35 BRT) e  $\kappa$  de 0,6044 UTC<sup>-1</sup>, conforme a Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Campo Grande – MS, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	16.648,3	17.050	17.451,7	23.228,2	23.530	23.831,8
$\beta$	15,90	16,08	16,26	14,65	15,62	16,60
$\kappa$	0,52264	0,5697	0,61676	0,60084	0,6335	0,66616

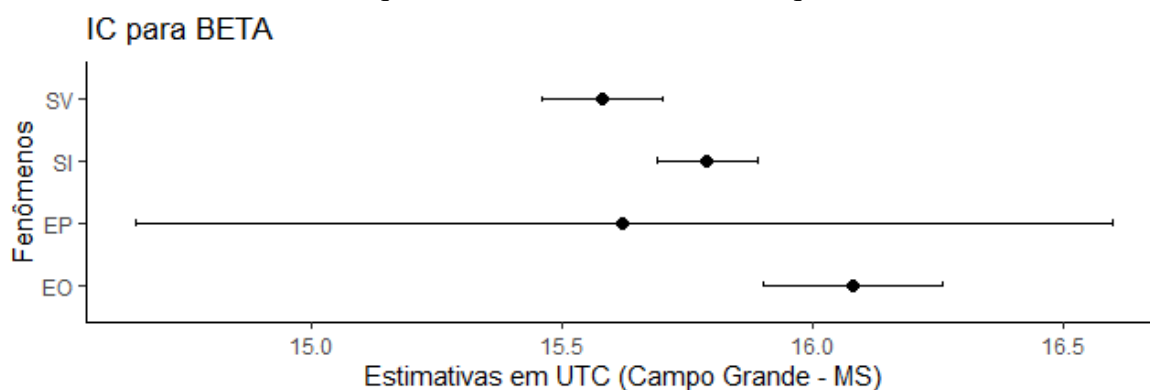
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	15.209,9	15.470	15.730,1	19.184,5	19.490	19.795,5
$\beta$	15,69	15,79	15,89	15,46	15,58	15,70
$\kappa$	0,66156	0,7030	0,74444	0,56771	0,6044	0,64109

Fonte: Do autor (2023).

O parâmetro  $\beta$  estimado para o Equinócio de Primavera e para os Solstícios é estatisticamente equivalente. Os parâmetros  $\beta$  estimados para os Equinócios são estatisticamente semelhantes, conforme a Figura 4.29.

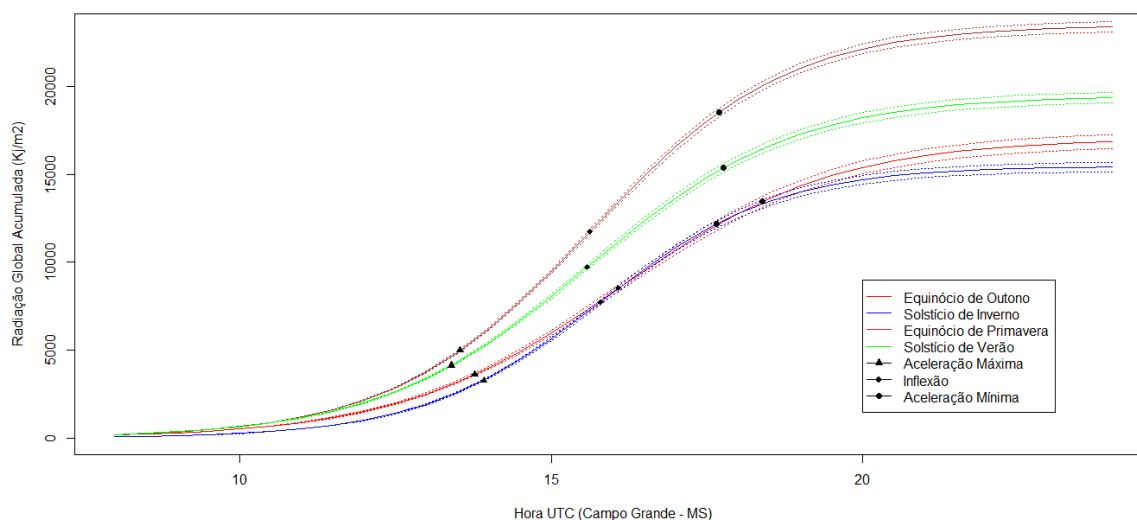
Figura 4.29 – Parâmetro  $\beta$  estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Campo Grande – MS; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.



Fonte: Do autor (2023)

Os valores assintóticos não são estatisticamente equivalentes, conforme a Figura 4.30. No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 13,77 UTC com 3.603,09 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 18,39 UTC com 13.446,91 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 13,92 UTC com 3.269,20 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,66 UTC com 12.200,80 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 13,54 UTC com 4.972,47 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,70 UTC com 18.557,53 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 13,40 UTC com 4.118,72 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,76 UTC com 15.371,28 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.30 – Modelo Logístico ajustado com o respectivo intervalo de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Campo Grande – MS.



Fonte: Do autor (2023)

O valor assintótico ser mínimo no Solstício de Inverno é um resultado esperado. Porém, ser máximo no Equinócio de Primavera não é um resultado esperado, mas se justifica pelas condições atmosféricas anuais da região.

#### 4.4.3 Considerações sobre os ajustes no Bioma Cerrado

O Modelo Logístico foi o que melhor se ajustou aos dados de irradiação global acumulada diária nas três cidades. O parâmetro assintótico foi máximo no Equinócio de Outono em Brasília e no Equinócio de Primavera em São Luís e Campo Grande. O parâmetro assintótico foi mínimo no Equinócio de Primavera em Brasília e no Solstício de Inverno em São Luís e Campo Grande.

#### 4.5 Cidades do Bioma Caatinga

No Bioma Caatinga, foram estudados os dados de irradiação global acumulada diária das cidades de Mossoró – RN e de Petrolina – PE.

#### 4.5.1 Mossoró – RN

O clima do município de Mossoró é semiárido, com uma temperatura média de 27,4 °C. A estação chuvosa ocorre no verão, estendendo-se para o outono, com precipitação pluviométrica anual muito irregular e uma umidade relativa média do ar de 68,9% (ESPÍNOLA SOBRINHO et al., 2011). Os maiores índices pluviométricos ocorrem entre fevereiro e abril, com o pico em março. A média anual é de 772,6 mm, caracterizando-o como um município com baixos índices de chuva, praticamente sem precipitação entre os meses de agosto e novembro (MANIÇOBA et al., 2017). Essas características climáticas influenciam a intensidade da irradiação que atinge o solo. O estudo da série histórica de 1970 a 1996 dos valores médios da radiação solar, realizado por Bezerra, Saraiva e Grigio (2019, p. 43), apresentou em março um valor de 250 W/m<sup>2</sup>/dia; em junho, 220 W/m<sup>2</sup>/dia; em setembro, 300 W/m<sup>2</sup>/dia; e em dezembro, 280 W/m<sup>2</sup>/dia. Ao estudar a radiação solar no período de 1970 a 2007, Assis et al. (2010, p. 9) obtiveram, em cal.cm<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, os seguintes valores: 905 em março, 750 em junho, 890 em setembro e 900 em dezembro. O ajuste dos dados de irradiação global acumulada ao nível do solo em Mossoró apresentou resultados semelhantes, com o parâmetro  $\alpha$  atingindo seu mínimo no Solstício de Inverno, enquanto os demais parâmetros apresentaram valores próximos, sendo o máximo observado no Equinócio de Primavera (Tabela 4.24 e Figura 4.32).

O Modelo Logístico foi o que melhor se ajustou aos dados da cidade de Mossoró. No ajuste do Equinócio de Outono, o modelo estimou o valor assintótico de 25.200 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão de 14,78 UTC (11:47 BRT) e  $\kappa$  de 0,6360 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste do Solstício de Inverno, o modelo estimou o valor assintótico de 20.620 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão de 14,51 UTC (11:31 BRT) e  $\kappa$  de 0,6692 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste do Equinócio de Primavera, o modelo estimou o valor assintótico de 26.180 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão de 14,51 UTC (11:31 BRT) e  $\kappa$  de 0,6216 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste do Solstício de Verão, o modelo estimou o valor assintótico de 27.470 kJ/m<sup>2</sup>, a abscissa do ponto de inflexão de 14,61 UTC (11:37 BRT) e  $\kappa$  de 0,5989 UTC<sup>-1</sup> (Tabela 4.24).

Tabela 4.24 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Mossoró – RN, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	24.824,1	25.200	25.575,9	25.749,2	26.180	26.610,8
$\beta$	14,68	14,78	14,88	14,39	14,51	14,63
$\kappa$	0,60189	0,6360	0,67011	0,58446	0,6216	0,65874

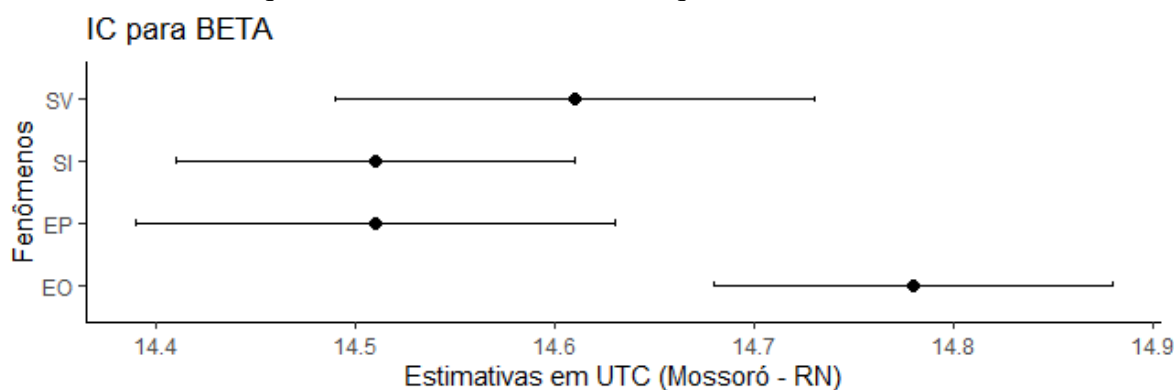
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	20.327,3	20.620	20.912,7	27.011,0	27.470	27.929,0
$\beta$	14,41	14,51	14,61	14,49	14,61	14,73
$\kappa$	0,63247	0,6692	0,70593	0,56415	0,5989	0,63365

Fonte: Do autor (2023)

Os parâmetros  $\beta$  para os solstícios e Equinócio de Primavera são estatisticamente equivalentes; assim como os parâmetros do Equinócio de Outono e do Solstício de Verão (Figura 4.31).

Figura 4.31 – Parâmetro  $\beta$  estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Mossoró – RN; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.

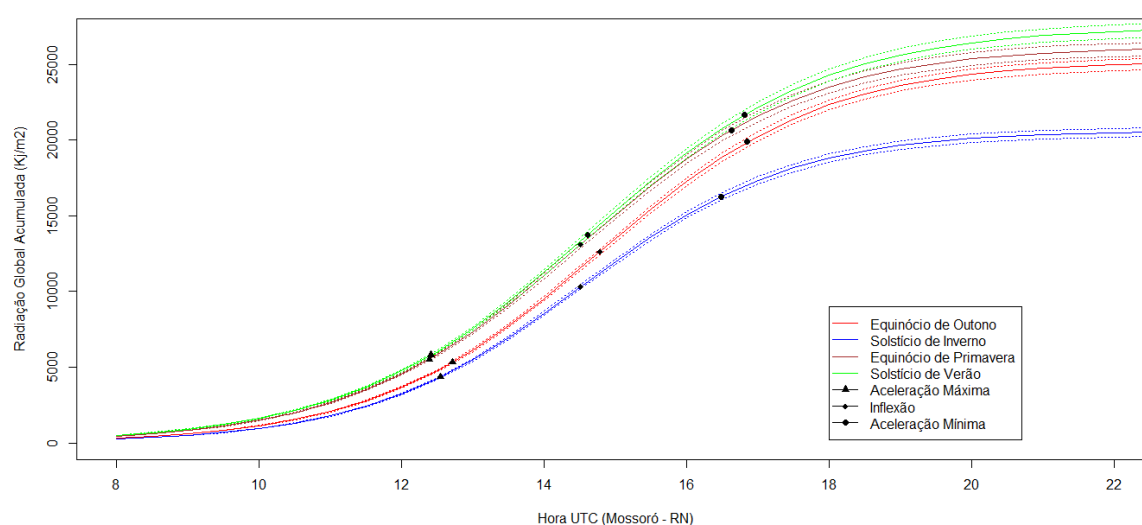


Fonte: Do autor (2023)

Os valores assintóticos, no entanto, não são estatisticamente equivalentes (Figura 4.32). No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 12:71 UTC com 5.325,39 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:85 UTC com 19.874,61 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 12:54 UTC com 4.357,52 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:48 UTC com 16.262,48 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração

máxima ocorre às 12:39 UTC com 5.532,48 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:63 UTC com 20.647,52 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 14:41 UTC com 5.805,09 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16:81 UTC com 21.664,91 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.32 – Modelo Logístico ajustado com o respectivo intervalo de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Mossoró – RN.



Fonte: Do autor (2023)

O fato de o parâmetro assintótico ser máximo no Solstício de Verão e mínimo no Solstício de Inverno é um resultado esperado. Contudo, os valores dos Equinócios serem próximos ao máximo não era um resultado esperado.

#### 4.5.2 Petrolina - PE

O estado de Pernambuco tem 70% de seu território localizado no Semiárido nordestino. As características naturais desse tipo de clima incluem secas periódicas, chuvas irregulares (novembro a abril) e mal distribuídas geograficamente. Esse quadro é agravado pelo fenômeno da evaporação, que provoca perdas significativas de água, atingindo uma média de 2.000 mm/ano no interior, podendo chegar a 3.000 mm/ano na área de Petrolina - PE (PEREIRA, 2015). Petrolina está situada na Mesorregião Sertão do São Francisco (MENDONÇA, 2016), uma região que apresenta baixa nebulosidade, forte insolação,

elevados índices de evaporação, temperaturas médias elevadas (em torno de 27°C) e baixa umidade relativa do ar.

A radiação solar global média diária, em Wh/m<sup>2</sup>, foi de 5.531 em março, 4.267 em junho, 5.786 em setembro e 5.939 em dezembro, em Petrolina, entre os anos de 1979 e 1988 (VILELA et al., 2014). No estudo da série histórica de 2009 a 2014, Oliveira e Malagón (2018, p. 4) obtiveram como resultados para as médias mensais da radiação global diária, em kWh/m<sup>2</sup>, 5,9 em março, 4,5 em junho, 6,0 em setembro e 5,5 em dezembro. Os resultados dos ajustes da irradiação diária acumulada apresentam características semelhantes às anteriores: o valor mínimo do parâmetro  $\alpha$  ocorreu no solstício de inverno, enquanto o valor máximo ocorreu no equinócio de primavera, com valores intermediários próximos (Tabela 4.25 e Figura 4.34).

O Modelo Logístico foi o que melhor se ajustou aos dados da cidade de Petrolina. No ajuste para o Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 16.740 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão de 15,43 UTC (12h26 BRT) e  $\kappa$  de 0,6040 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 11.580 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão de 15,22 UTC (12h13 BRT) e  $\kappa$  de 0,6412 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Equinócio de Primavera, o modelo estimou um valor assintótico de 18.420 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão de 15,09 UTC (12h05 BRT) e  $\kappa$  de 0,6208 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 16.730 kJ/m<sup>2</sup>, abscissa do ponto de inflexão de 14,89 UTC (11h53 BRT) e  $\kappa$  de 0,6058 UTC<sup>-1</sup> (Tabela 4.25).

Tabela 4.25 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Petrolina – PE, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	16.408,9	16.740	17.071,1	18.118,0	18.420	18.722,0
$\beta$	15,30	15,43	15,56	14,98	15,09	15,20
$\kappa$	0,5661	0,6040	0,6419	0,58628	0,6208	0,65532

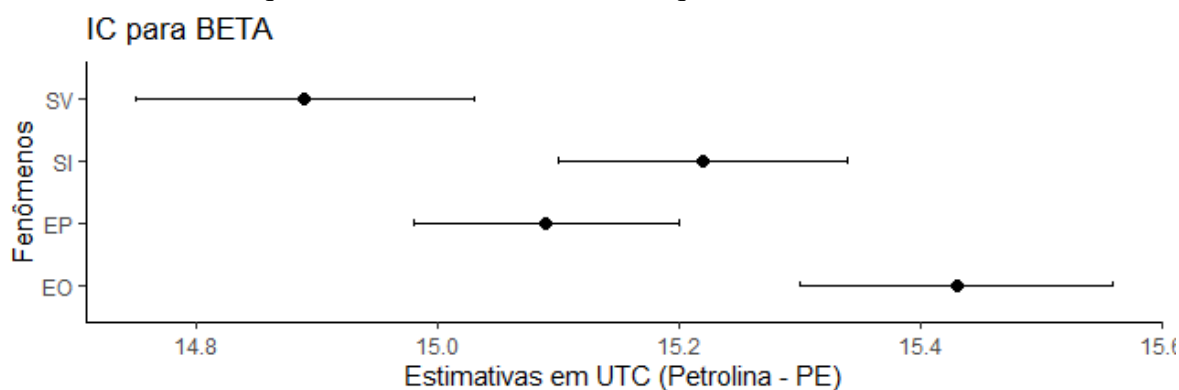
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	11.364,3	11.580	11.795,7	16.403,9	16.730	17.056,1
$\beta$	15,10	15,22	15,34	14,75	14,89	15,03
$\kappa$	0,60008	0,6412	0,68232	0,56566	0,6058	0,64594

Fonte: Do autor (2023)

Os parâmetros  $\beta$  estimados são estatisticamente semelhantes nos seguintes períodos: Solstício de Verão e Equinócio de Primavera; Equinócio de Primavera e Solstício de Inverno; Solstício de Inverno e Equinócio de Outono (Figura 4.33).

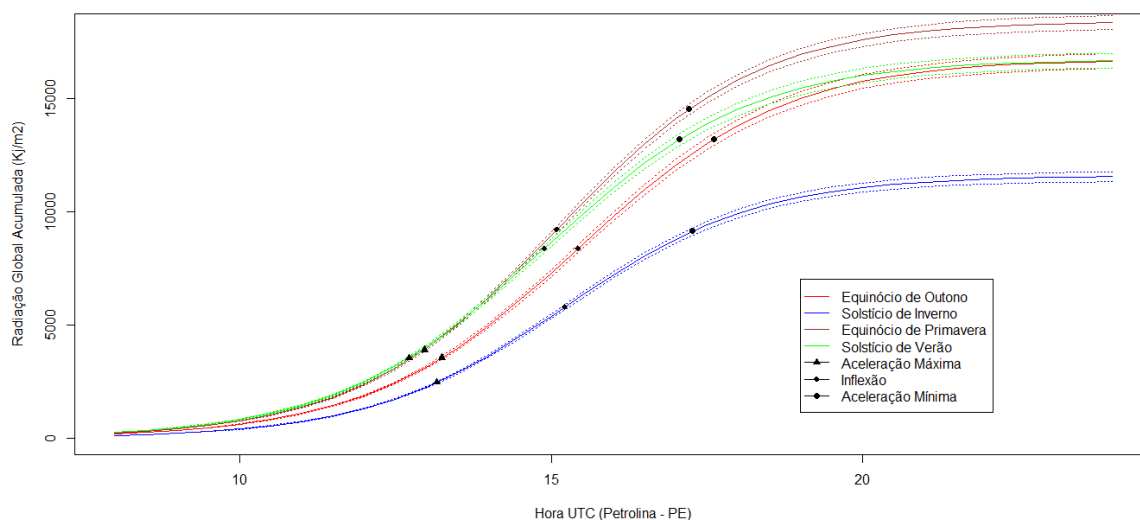
Figura 4.33 – Parâmetro  $\beta$  estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Petrolina – PE; em que SV é Solstício de Verão, SI é Solstício de Inverno, EP é Equinócio de Primavera e EO é Equinócio de Outono.



Fonte: Do autor (2023)

Os valores assintóticos do Equinócio de Outono e do Solstício de Verão são estatisticamente equivalentes; entretanto, não há equivalência entre os demais valores assintóticos (Figura 4.34). No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 13h25 UTC com 3.537,58 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17h61 UTC com 13.202,42 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 13h17 UTC com 2.447,14 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17h27 UTC com 9.132,86 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 12h97 UTC com 3.892,60 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17h21 UTC com 14.527,40 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 12h72 UTC com 3.535,46 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17h06 UTC com 13.194,54 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.34 – Modelo Logístico ajustado com os respectivos intervalos de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Petrolina – PE.



Fonte: Do autor (2023)

O valor assintótico ser mínimo no Solstício de Inverno é um resultado esperado. No entanto, os parâmetros  $\alpha$  do Solstício de Verão e do Equinócio de Outono serem estatisticamente semelhantes não é um resultado esperado, assim como o valor máximo ocorrer no Equinócio de Primavera.

#### 4.4.3 Considerações sobre os ajustes no Bioma Caatinga

O Modelo Logístico foi o que melhor se ajustou aos dados de irradiação global acumulada diária nas duas cidades. O parâmetro assintótico foi máximo no Solstício de Verão em Mossoró e Equinócio de Primavera em Petrolina. O parâmetro foi mínimo no Solstício de Inverno em ambas as cidades.

#### 4.5 Cidades do Bioma Pampa

No Bioma Pampa, os dados de irradiação solar global acumulada diária foram estudados nas cidades de Santa Maria – RS e de Santa Vitória do Palmar – RS.

#### 4.5.1 Santa Maria - RS

Segundo Cargnelutti Filho, Matzenauer e Trindade (2004, p. 1160), de modo geral, ocorre um aumento da radiação solar global média decendial no sentido Nordeste-Sudeste, o que justifica os parâmetros  $\alpha$  estimados nos modelos para a cidade de Santa Vitória do Palmar apresentarem valores maiores do que os parâmetros da cidade de Santa Maria, tanto nos equinócios quanto no solstício de verão. Nos meses de maio, junho, julho e agosto, ocorre uma diminuição no sentido Norte-Sul, o que justifica o parâmetro  $\alpha$  estimado para o solstício de inverno em Santa Maria ser maior do que o da cidade de Santa Vitória do Palmar, conforme demonstrado nas Tabelas 4.22 e 4.23, e nas Figuras 4.36 e 4.37.

Segundo Buriol et al. (2012), existe uma forte correlação entre os elementos meteorológicos insolação e densidade de fluxo de radiação solar diários registrados em Santa Maria – RS. Nos meses em que há maior insolação, a radiação solar global é também maior. De acordo com Estefanel et al. (1990, p. 213), o verão é a estação em que se observa a maior média acumulada de fluxo de radiação solar global, enquanto o inverno registra a menor média. Os modelos ajustados confirmam essas afirmações, conforme demonstrado na Tabela 4.26 e na Figura 4.36.

O ajuste dos dados da cidade de Santa Maria foi realizado utilizando o Modelo Logístico. No ajuste para o Equinócio de Outono, o modelo estimou o valor assintótico em  $17.620 \text{ kJ/m}^2$ , a abscissa do ponto de inflexão em  $16,09 \text{ UTC}$  ( $13:47 \text{ BRT}$ ) e o valor de  $\kappa$  em  $0,6188 \text{ UTC}^{-1}$ . No ajuste para o Solstício de Inverno, o modelo estimou o valor assintótico em  $9.946 \text{ kJ/m}^2$ , a abscissa do ponto de inflexão em  $15,52 \text{ UTC}$  ( $12:31 \text{ BRT}$ ) e o valor de  $\kappa$  em  $0,8005 \text{ UTC}^{-1}$ . Para o Equinócio de Primavera, o modelo estimou o valor assintótico em  $15.550 \text{ kJ/m}^2$ , a abscissa do ponto de inflexão em  $15,51 \text{ UTC}$  ( $12:31 \text{ BRT}$ ) e o valor de  $\kappa$  em  $0,6222 \text{ UTC}^{-1}$ . No Solstício de Verão, o modelo estimou o valor assintótico em  $22.710 \text{ kJ/m}^2$ , a abscissa do ponto de inflexão em  $15,55 \text{ UTC}$  ( $12:37 \text{ BRT}$ ) e o valor de  $\kappa$  em  $0,5633 \text{ UTC}^{-1}$ , conforme apresentado na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Santa Maria – RS, intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	17.368,1	17.620	17.871,9	15.260,0	15.550	15.840,0
$\beta$	15,98	16,09	16,20	15,39	15,51	15,63
$\kappa$	0,58548	0,6188	0,65212	0,58468	0,6222	0,65972

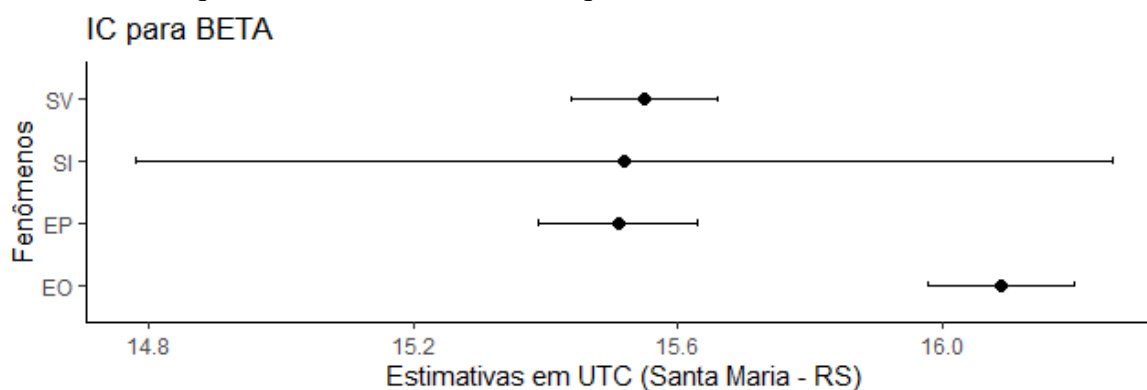
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	9.825,0	9.946	10.067,0	22.396,7	22.710	23.023,3
$\beta$	14,78	15,52	16,26	15,44	15,55	15,66
$\kappa$	0,76111	0,8005	0,83989	0,53487	0,5633	0,59173

Fonte: Do autor (2023)

Os parâmetros  $\beta$  estimados dos Solstícios e do Equinócio de Primavera são estatisticamente equivalentes, assim como os parâmetros do Equinócio de Outono e do Solstício de Inverno, conforme a Figura 4.35.

Figura 4.35 – Parâmetro  $\beta$  estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Logístico ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Santa Maria – RS. SV: Solstício de Verão; SI: Solstício de Inverno; EP: Equinócio de Primavera; EO: Equinócio de Outono.

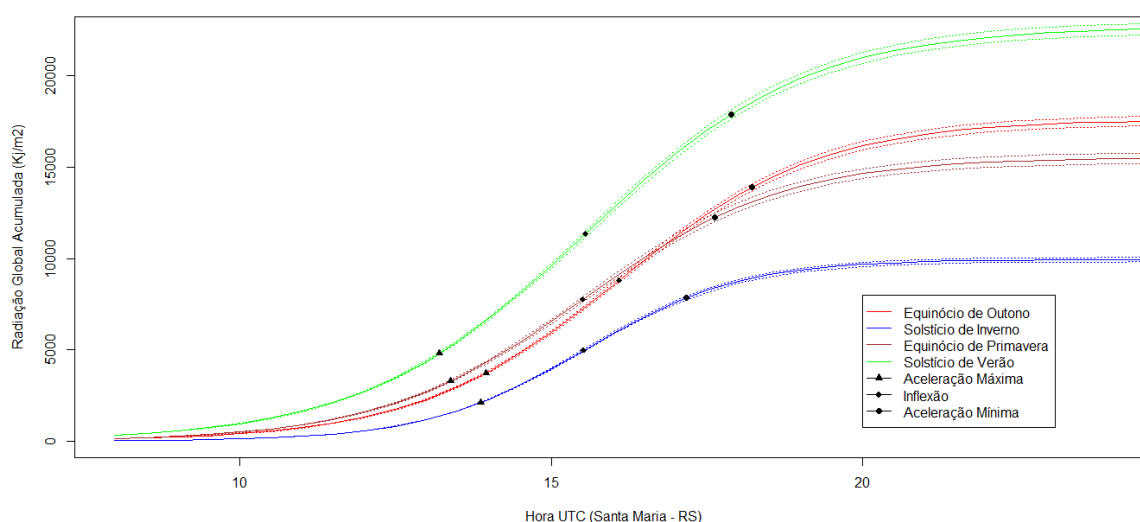


Fonte: Do autor (2023)

Os valores assintóticos não são estatisticamente equivalentes, conforme mostrado na Figura 4.36. No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 13,96 UTC com 3.723,54 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 18,22 UTC com 13.896,46 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 13,87 UTC com 2.101,84 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,17 UTC com 7.844,16 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a

aceleração máxima ocorre às 13,39 UTC com 3.286,10 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,63 UTC com 12.263,90 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 13,21 UTC com 4.799,19 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,89 UTC com 17.910,81 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.36 – Modelo Logístico ajustado com o respectivo intervalo de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Santa Maria – RS.



Fonte: Do autor (2023)

Os resultados dos parâmetros  $\alpha$  ser mínimo no Solstício de Inverno e máximo no Solstício de Verão são resultados esperados. No entanto, esperava-se que os parâmetros assintóticos dos Equinócios fossem estatisticamente equivalentes, o que não ocorreu.

#### 4.5.2 Santa Vitória do Palmar - RS

No Rio Grande do Sul, de modo geral, a radiação solar global média apresenta valores mais elevados em janeiro e dezembro, com uma redução em junho e julho. Segundo Cargnelutti Filho, Matzenauer e Trindade (2004, p. 1160), isso se deve ao Solstício de Verão, que ocorre na segunda quinzena de dezembro, e à consequente redução gradativa da irradiação global, além do aumento da declinação solar máxima durante o Solstício de Inverno, que ocorre na segunda quinzena de junho. Os modelos confirmaram esse comportamento da irradiação solar global acumulada, uma vez que o maior valor assintótico

foi observado no Solstício de Verão e o menor, no Solstício de Inverno, conforme apresentado na Tabela 4.27 e na Figura 4.38.

Os dados da cidade de Santa Vitória do Palmar foram ajustados utilizando o Modelo Gompertz. No ajuste para o Equinócio de Outono, o modelo estimou um valor assintótico de 19.770 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 14,94 UTC (11:55 BRT) e  $\kappa$  de 0,3823 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Inverno, o modelo estimou um valor assintótico de 7.028 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 14,80 UTC (11:48 BRT) e  $\kappa$  de 0,5092 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Equinócio de Primavera, o modelo estimou um valor assintótico de 17.700 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 14,45 UTC (11:27 BRT) e  $\kappa$  de 0,3853 UTC<sup>-1</sup>. No ajuste para o Solstício de Verão, o modelo estimou um valor assintótico de 33.300 kJ/m<sup>2</sup>, uma abscissa do ponto de inflexão de 14,48 UTC (11:29 BRT) e  $\kappa$  de 0,3246 UTC<sup>-1</sup>, conforme apresentado na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 – Estimativas dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  com os respectivos limites inferiores e superiores do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Santa Vitória do Palmar – RS, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	Equinócio de Outono – Março			Equinócio da Primavera – Setembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	19.307,0	19.770	20.233,0	17.285,8	17.700	18.114,2
$\beta$	14,84	14,94	15,04	14,34	14,45	14,56
$\kappa$	0,35852	0,3823	0,40608	0,35978	0,3853	0,41082

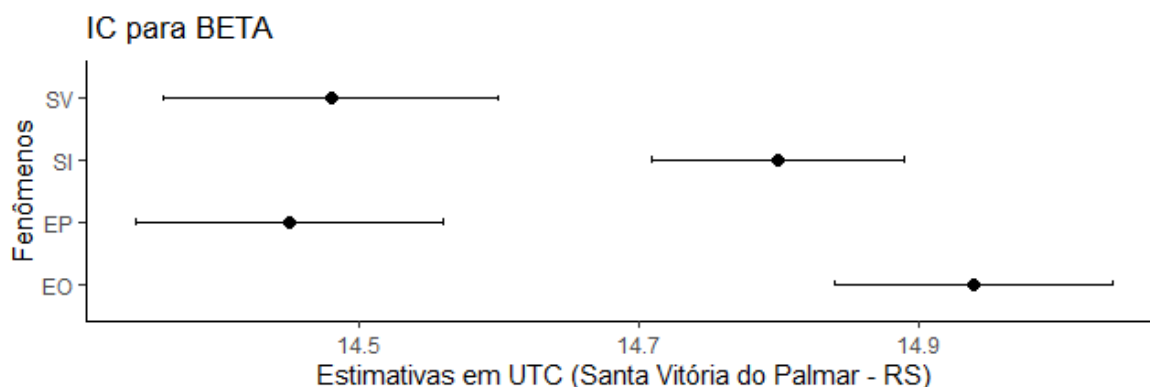
  

Parâmetro	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	L.inf.	Estimativa	L.sup.	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$\alpha$	6.884,0	7.028	7.172,0	32.614,9	33.300	33.985,1
$\beta$	14,71	14,80	14,89	14,36	14,48	14,60
$\kappa$	0,47211	0,5092	0,54629	0,30501	0,3246	0,34419

Fonte: Do autor (2023)

Os parâmetros  $\beta$  estimados do Equinócio de Primavera e do Solstício de Verão são estatisticamente equivalentes, assim como os parâmetros do Solstício de Inverno e do Equinócio de Outono, conforme ilustrado na Figura 4.37.

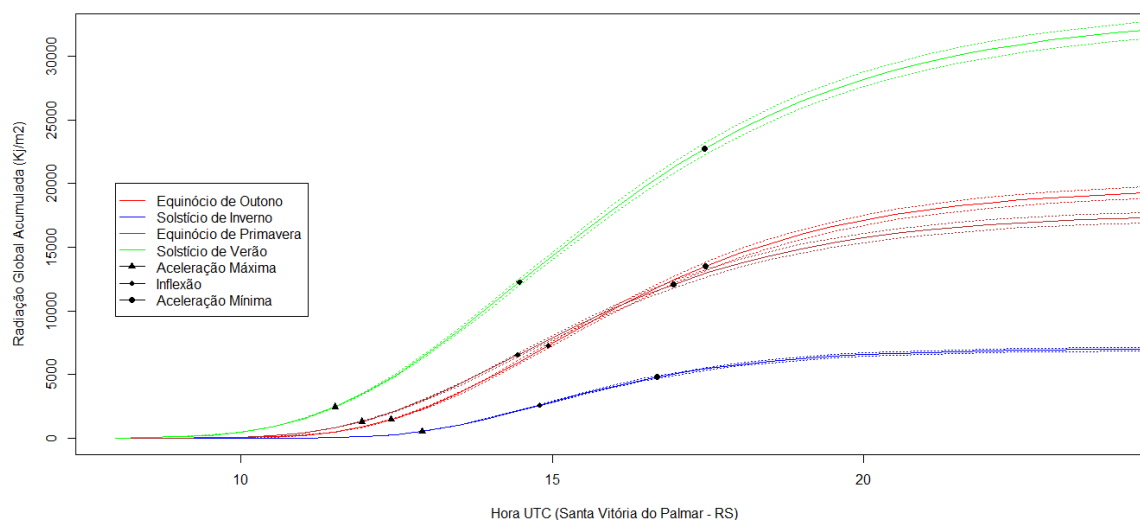
Figura 4.37 – Parâmetro  $\beta$  estimado e intervalo de confiança de 95% do Modelo Gompertz ajustado aos dados de irradiação global acumulada ao longo do dia na cidade de Santa Vitória do Palmar – RS.



Fonte: Do autor (2023)

Os valores assintóticos, por outro lado, não são estatisticamente equivalentes, conforme mostrado na Figura 4.38. No Equinócio de Outono, a aceleração máxima ocorre às 12,42 UTC, com 1.442,15 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,46 UTC, com 13.493,39 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Inverno, a aceleração máxima ocorre às 12,91 UTC, com 512,67 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,69 UTC, com 4.796,74 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Equinócio de Primavera, a aceleração máxima ocorre às 11,95 UTC, com 1.291,15 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 16,95 UTC, com 12.080,57 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada. No Solstício de Verão, a aceleração máxima ocorre às 11,52 UTC, com 2.429,11 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada, e a aceleração mínima ocorre às 17,44 UTC, com 22.727,86 kJ/m<sup>2</sup> de energia acumulada.

Figura 4.38 – Modelo Gompertz ajustado com o respectivo intervalo de confiança de 95%, pontos de inflexão, pontos de máxima aceleração e mínima aceleração, irradiação global acumulada ao longo do dia nos equinócios e nos solstícios, cidade de Santa Vitória do Palmar – RS.



Fonte: Do autor (2023)

O parâmetro  $\alpha$  apresentou seu valor mínimo no Solstício de Inverno e máximo no Solstício de Verão, o que é esperado. Contudo, os valores assintóticos dos equinócios não são estatisticamente equivalentes.

#### 4.5.3 Considerações sobre o Bioma Pampa

O Modelo Logístico apresentou melhor ajuste para os dados da cidade de Santa Maria, enquanto na cidade de Santa Vitória do Palmar o melhor ajuste foi obtido com o Modelo Gompertz. Em ambos os ajustes, o valor assintótico foi máximo no Solstício de Verão e mínimo no Solstício de Inverno.

#### 4.6 Os parâmetros

No estudo da radiação global observada em uma mesma cidade, esperava-se que o valor assintótico ( $\alpha$ ) fosse máximo no Solstício de Verão, mínimo no Solstício de Inverno e equivalente nos equinócios. Também se esperava que esses valores máximos fossem maiores nas cidades localizadas em menores latitudes. Para o parâmetro de abscissa do ponto de inflexão ( $\beta$ ), esperava-se que fosse equivalente nos solstícios e equinócios em uma mesma cidade, além de apresentar uma correlação linear com a longitude.

#### 4.6.1 Valor assintótico

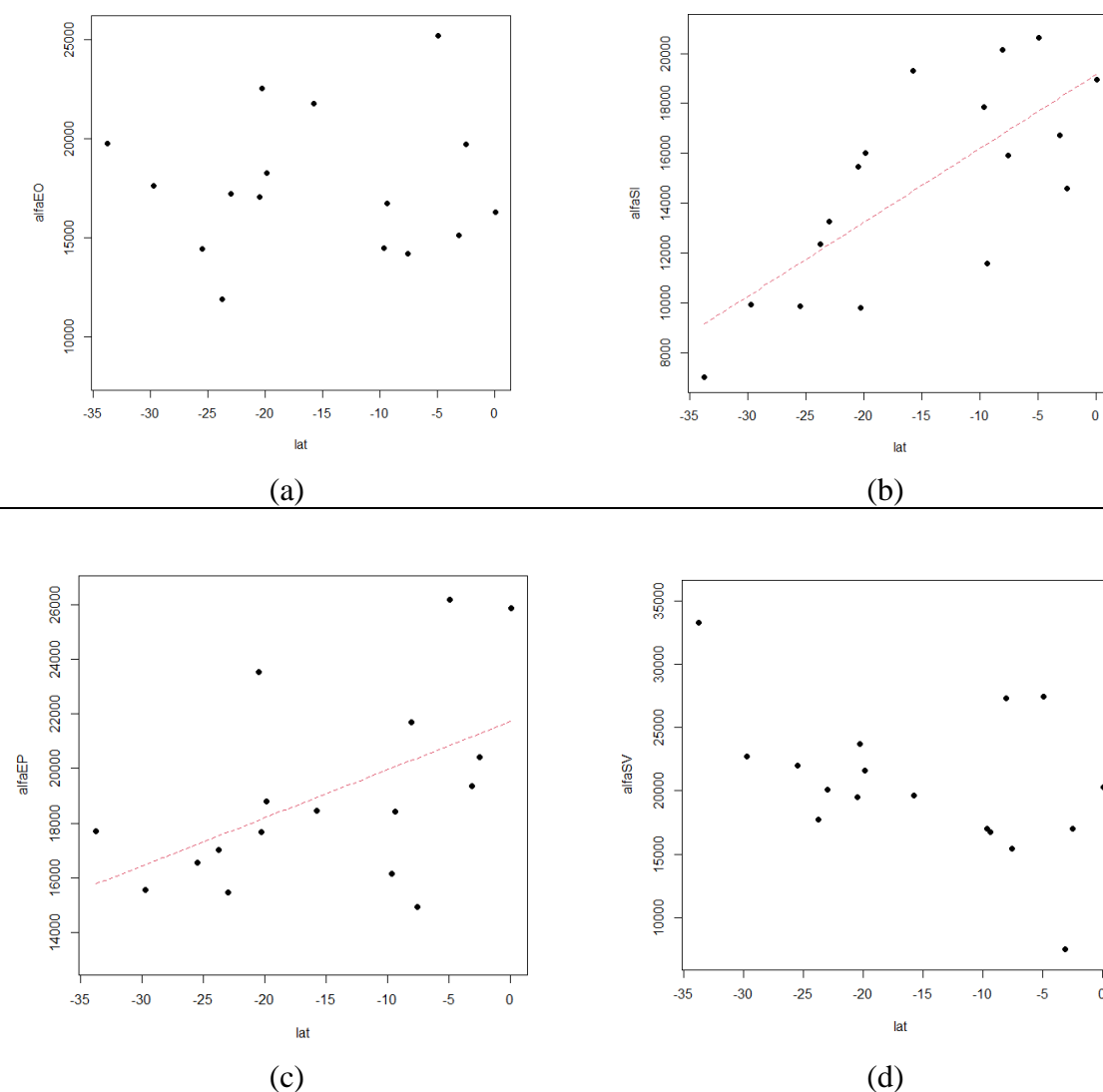
O esperado é que o valor assintótico ( $\alpha$ ) do Solstício de Verão seja máximo, do Solstício de Inverno seja mínimo e que os valores dos equinócios sejam equivalentes.

#### 4.6.2 Valor assintótico e latitude

Na relação entre os valores assintóticos ( $\alpha$ ) e a latitude, é esperado que haja uma correlação positiva, pois, à medida que se afasta da latitude do equador em direção ao Polo Sul, o valor da latitude diminui, e, conseqüentemente, espera-se que o valor assintótico também diminua.

Os gráficos de dispersão dos valores assintóticos e das latitudes estão representados na Figura 4.39. Os valores assintóticos do Equinócio de Outono estão representados na Figura 4.39 (a), com coeficiente de correlação de 0,1351, indicando uma correlação positiva muito fraca. Na Figura 4.39 (b), estão representados os valores assintóticos do Solstício de Inverno, com coeficiente de correlação de 0,7443, indicando uma correlação positiva forte. Na Figura 4.39 (c), estão representados os valores assintóticos do Equinócio de Primavera, com coeficiente de correlação de 0,5229, indicando uma correlação positiva moderada. Na Figura 4.39 (d), estão representados os valores do Solstício de Verão, onde a correlação é de -0,4681, indicando uma correlação negativa moderada, que deve ser desconsiderada pelo fato de ser uma correlação negativa sem significado prático.

Figura 4.39 – Gráfico de dispersão das latitudes e dos parâmetros ( $\alpha$ ), em  $kJ/m^2$ , Equinócio de Outono (a), Solstício de Inverno (b), Equinócio de Primavera (c) e Solstício de Verão (d).



Fonte: Do autor (2023)

Os parâmetros da regressão linear dos valores assintóticos ( $\alpha_{SI}$ ) do Solstício de Inverno e das latitudes ( $lat$ ) estão representados na Figura 4.35 (b). Os parâmetros da regressão estão apresentados na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 – Parâmetros da regressão linear dos valores assintóticos ( $\alpha_{SI}$ ) do Solstício de Inverno e latitudes ( $lat$ ), com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	17.914,64	19.158,39	20.404,14
$A_1$	227,72	296,38	365,04

Fonte: Do autor (2023)

A função (4.7) permite calcular o parâmetro  $\alpha$  para o Modelo Logístico ou Modelo Gompertz no Solstício de Inverno, em cidades brasileiras localizadas entre as latitudes  $0,0350^{\circ}$  e  $-33,7422^{\circ}$ , com 95% de confiança. Na função o parâmetro é denotado por  $\alpha_{SI}$ :

$$\alpha_{SI} = 19.158,39 + 296,38 \times lat. \quad (4.7)$$

Os parâmetros da regressão linear dos valores assintóticos ( $\alpha_{EP}$ ) do Equinócio de Primavera e das latitudes ( $lat$ ) estão representados na Figura 4.35 (c). Os parâmetros da regressão estão apresentados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Parâmetros da regressão linear dos valores assintóticos ( $\alpha_{EP}$ ) do Equinócio de Primavera e latitudes ( $lat$ ), com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	20.369,62	21.713,09	23.056,56
$A_1$	102,06	176,22	250,38

Fonte: Do autor (2023)

A função (4.8) permite calcular o parâmetro  $\alpha$  do Modelo Logístico ou Modelo Gompertz no Equinócio de Primavera, em cidades brasileiras localizadas entre as latitudes  $0,0350^{\circ}$  e  $-33,7422^{\circ}$ , com 95% de confiança. Na função o parâmetro  $\alpha_{EP}$  é denotado por:

$$\alpha_{EP} = 21.713,09 + 176,22 \times lat. \quad (4.8)$$

#### 4.6.3 Possíveis fontes de perturbação dos valores assintóticos

O estudo foi realizado em 17 cidades, distribuídas por regiões: na região Centro-Oeste, foram utilizados dados de 2 cidades; na região Sul, de 3 cidades; e nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste, de 4 cidades cada. Para avaliar indicadores que possam justificar as diferenças entre os valores esperados e os resultados obtidos na modelagem, foram selecionadas quatro cidades localizadas em diferentes latitudes, longitudes e biomas. A cidade de Humaitá está situada no bioma Amazônia, Brasília no bioma Cerrado, São Paulo no bioma Mata Atlântica e Santa Vitória do Palmar no bioma Pampa.

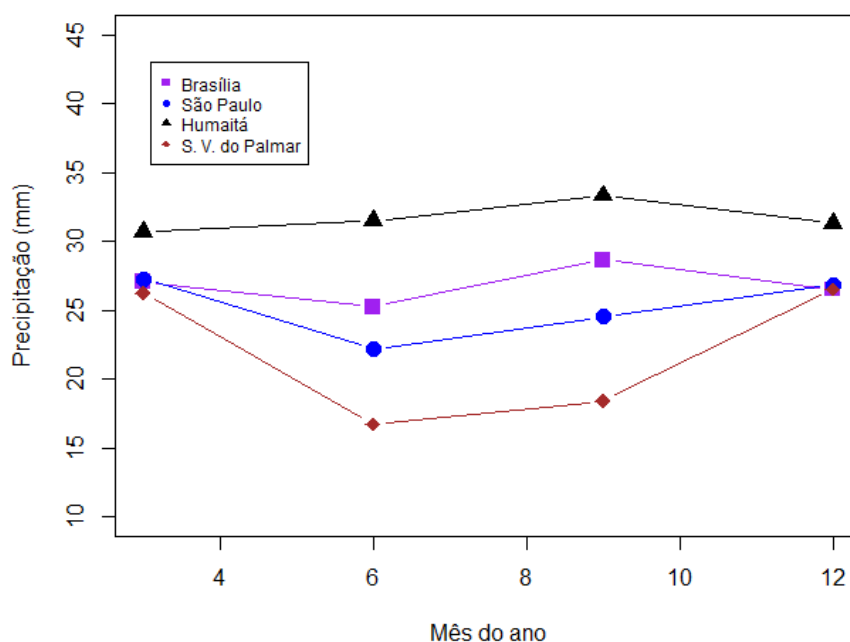
O Modelo Logístico apresentou melhor ajuste para os dados de Brasília (Centro-Oeste) e São Paulo (Sudeste), enquanto o Modelo Gompertz se ajustou melhor aos dados de Humaitá (Norte) e Santa Vitória do Palmar (Sul). Para comparar esses ajustes, foram selecionados dados de precipitação pluviométrica acumulada (mm), temperatura do ponto de orvalho ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar horária (%), e a diferença entre a temperatura do ar - bulbo seco, horária e a temperatura do ponto de orvalho horária ( $^{\circ}\text{C}$ ). A temperatura do ponto

de orvalho é a temperatura na qual o ar úmido atinge a saturação da umidade e inicia o processo de condensação (MARGARIDO, FRAJUCA, BORTOLI, 2019).

#### 4.6.3.1 Precipitação pluviométrica

O INMET não disponibiliza os dados de precipitação pluviométrica por hora; portanto, os valores comparados são as médias dos períodos de 1931-1960, 1961-1990 e 1991-2020, conforme mostrado na Figura 4.40. Embora a região Amazônica seja associada a altos índices de radiação solar global devido à sua posição equatorial, estes índices são fortemente impactados pelo regime de precipitação da bacia hidrográfica. Os menores valores médios de radiação global em Manaus ocorrem durante o período chuvoso, sendo inferiores aos observados em locais de média e alta latitude. Na Figura 4.40, observa-se que a média mensal de precipitação em Humaitá é maior do que em Santa Vitória do Palmar, Brasília e São Paulo, cidades localizadas em latitudes maiores. O valor assintótico do ajuste no solstício de verão para Humaitá (Tabela 4.20) é menor do que os valores de São Paulo e Santa Vitória do Palmar, conforme mostrado nas Tabelas 4.10 e 4.29, respectivamente.

Figura 4.40 – Precipitação pluviométrica acumulada mensal média no período 1931 a 2020, nos meses de março, junho, setembro e dezembro.



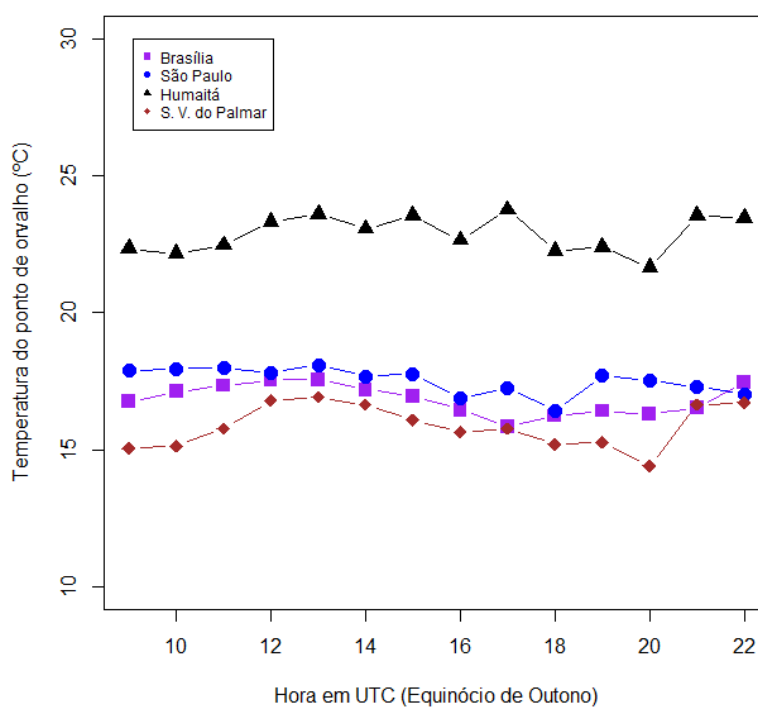
Fonte: Do autor (2023)

Observa-se que Humaitá apresenta maior precipitação nas quatro estações do ano, enquanto Santa Vitória do Palmar registra menor precipitação no inverno e na primavera. Os dados dessas cidades foram melhor ajustados pelo Modelo Gompertz. A precipitação tem valores intermediários em Brasília e São Paulo durante o inverno e a primavera, e os dados dessas cidades foram melhores ajustados pelo Modelo Logístico.

#### 4.6.3.2 Temperatura do ponto de orvalho

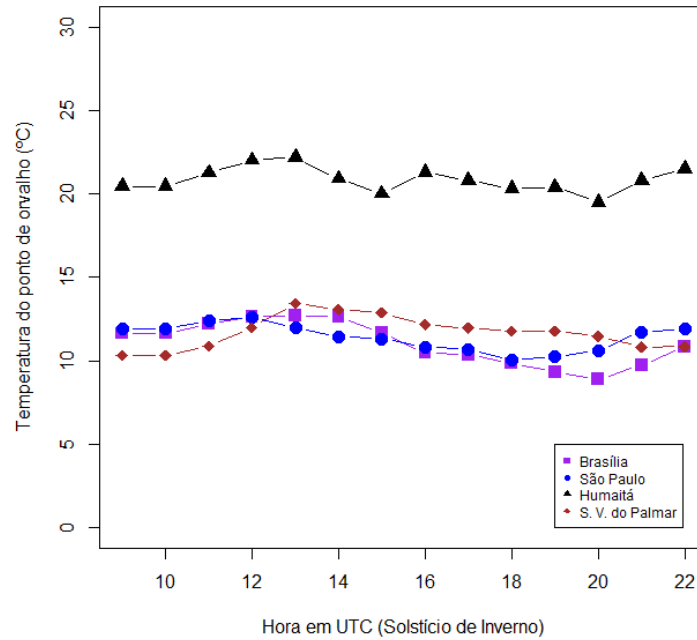
As médias das temperaturas (em  $^{\circ}\text{C}$ ) do ponto de orvalho no período 2018-2022, durante os equinócios e dos solstícios, estão representadas nos gráficos das Figuras 4.41, 4.42, 4.43 e 4.44.

Figura 4.41 – Média horária da temperatura do ponto de orvalho equinócio de outono no período 2018-2022.



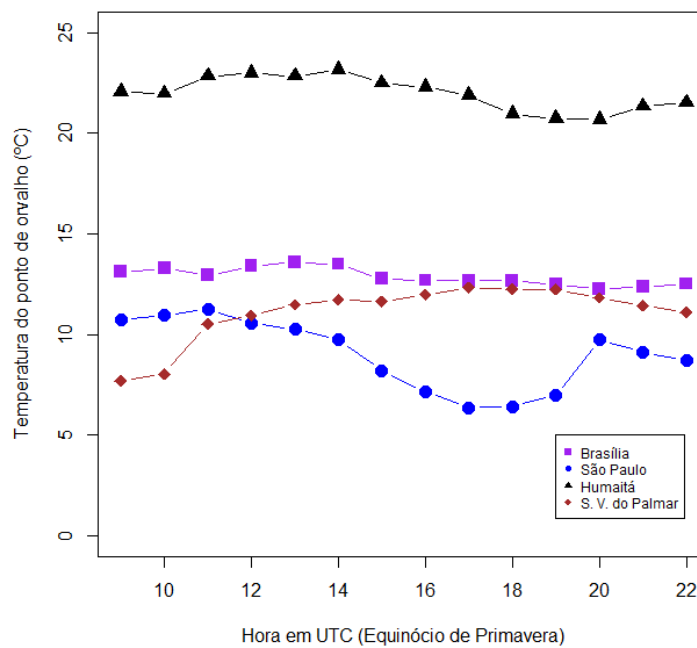
Fonte: Do autor (2023)

Figura 4.42 – Média horária da temperatura do ponto de orvalho solstício de inverno no período 2018-2022.



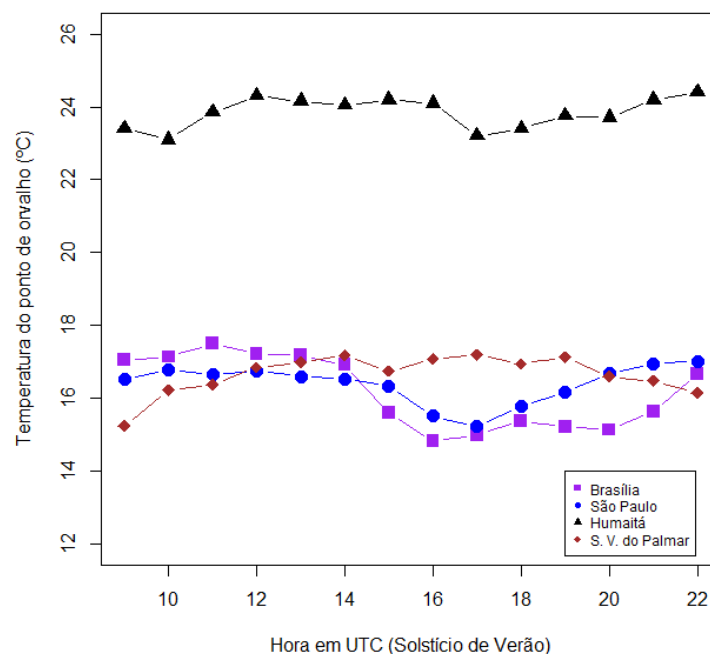
Fonte: Do autor (2023)

Figura 4.43 – Média horária da temperatura do ponto de orvalho equinócio de primavera no período 2018-2022.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 4.44 – Média horária da temperatura do ponto de orvalho solstício de verão no período 2018-2022.



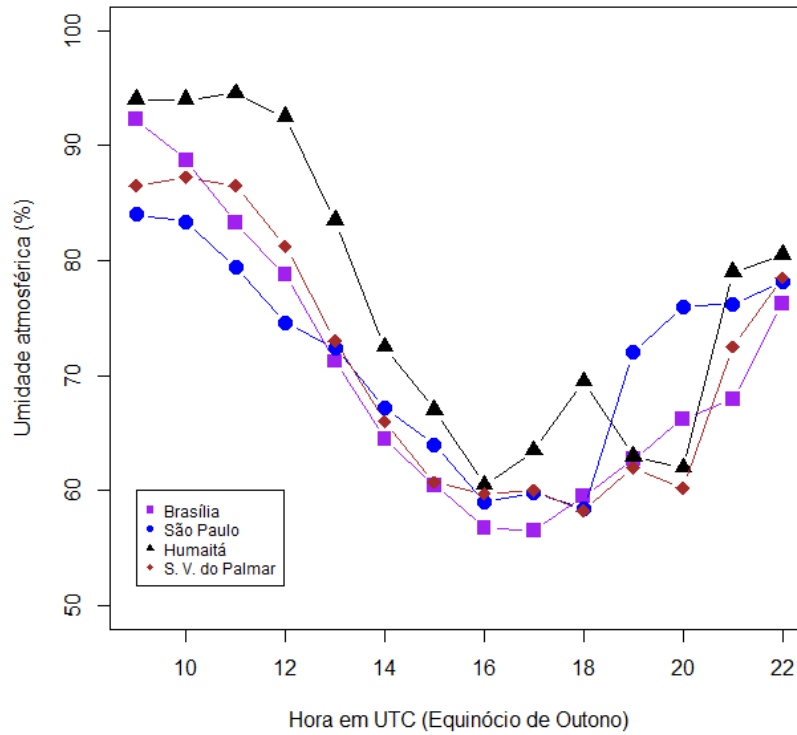
Fonte: Do autor (2023).

A temperatura média horária do ponto de orvalho é mais elevada em Humaitá ao longo de todo o dia e mais baixa nas primeiras horas da manhã em Santa Vitória do Palmar, ambas as cidades cujos dados foram melhor ajustados pelo Modelo Gompertz. Esse modelo apresentou melhor ajuste para cidades onde a umidade atmosférica está próxima à saturação.

#### 4.6.3.3 Umidade relativa do ar

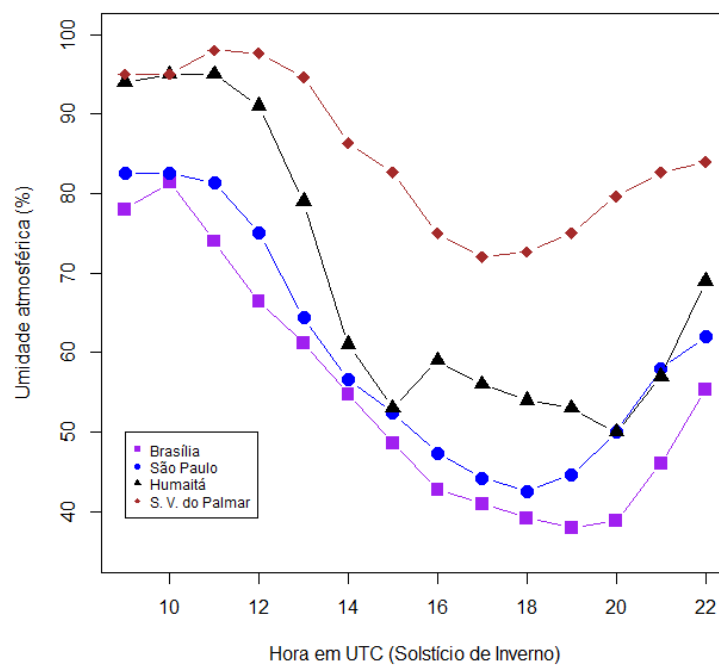
As médias umidades relativas do ar horária (em %) no período 2018-2022, durante os equinócios e dos solstícios, estão representadas nos gráficos das figuras 4.46, 4.46, 4.47 e 4.48.

Figura 4.45 – Média horária da umidade atmosférica (em %) equinócio de outono no período 2018-2022.



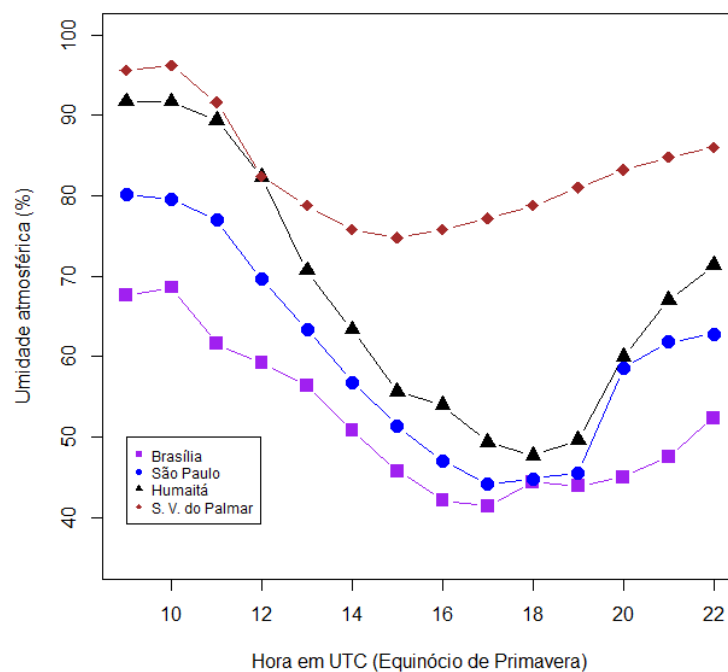
Fonte: Do autor (2023).

Figura 4.46 – Média horária da umidade (em %) solstício de inverno no período 2018-2022.



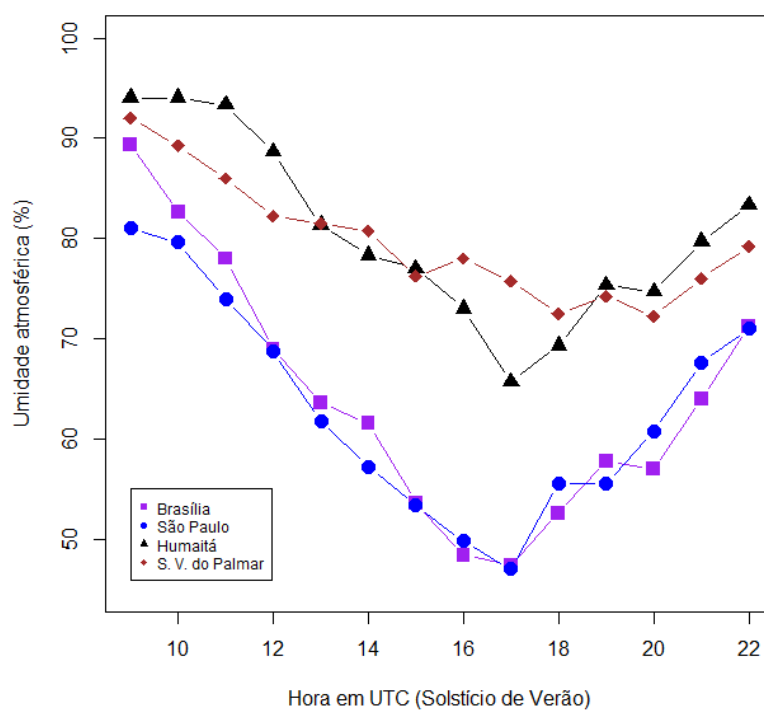
Fonte: Do autor (2023).

Figura 4.47 – Média horária da umidade (em %) equinócio de primavera no período 2018-2022.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 4.48 – Média horária da umidade (em %) solstício de verão no período 2018-2022.



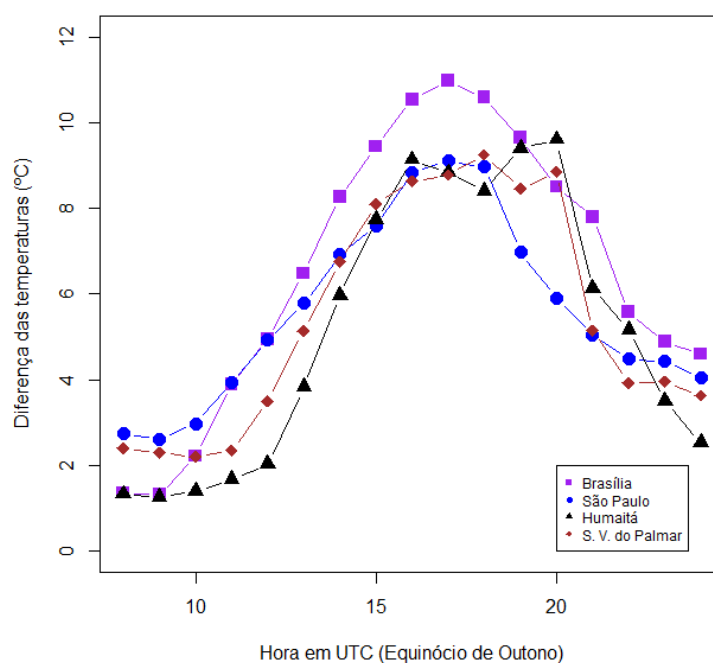
Fonte: Do autor (2023).

A umidade relativa média horária (em %) apresenta valores mais elevados em Humaitá e Santa Vitória do Palmar nas primeiras horas da manhã durante o equinócio de outono (Figura 4.45) e ao longo de todo o dia no equinócio de primavera e nos solstícios (Figuras 4.46, 4.47 e 4.48). O Modelo Gompertz apresentou o melhor ajuste para os dados dessas cidades.

#### 4.18.3.4 Diferença entre a temperatura do ar (bulbo seco) horária e a temperatura do ponto de orvalho horária.

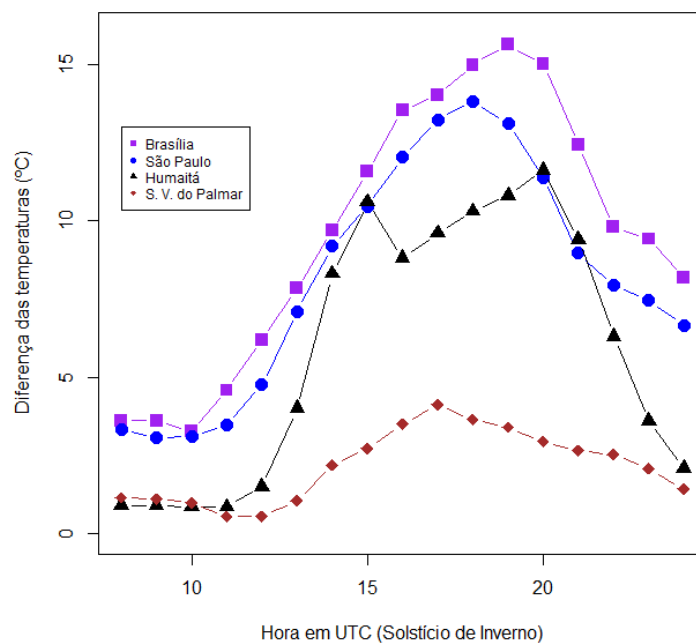
As médias horárias das diferenças entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho, em °C, no período de 2018 a 2022, durante os equinócios e solstícios, estão representadas nos gráficos das Figuras 4.49, 4.50, 4.51 e 4.52.

Figura 4.49 – Média horária da diferença entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho, em °C, no Equinócio de Outono no período 2018-2022.



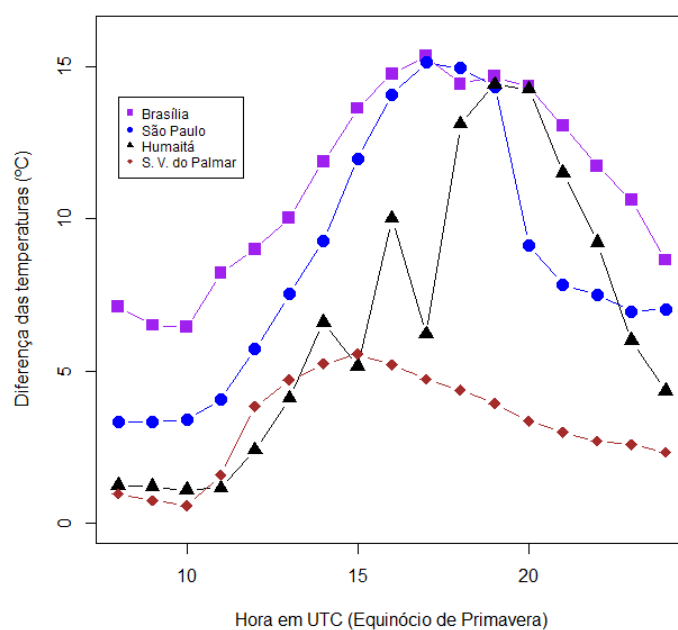
Fonte: Do autor (2023).

Figura 4.50 – Média horária da diferença entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho, em  $^{\circ}\text{C}$ , no Solstício de Inverno no período 2018-2022.



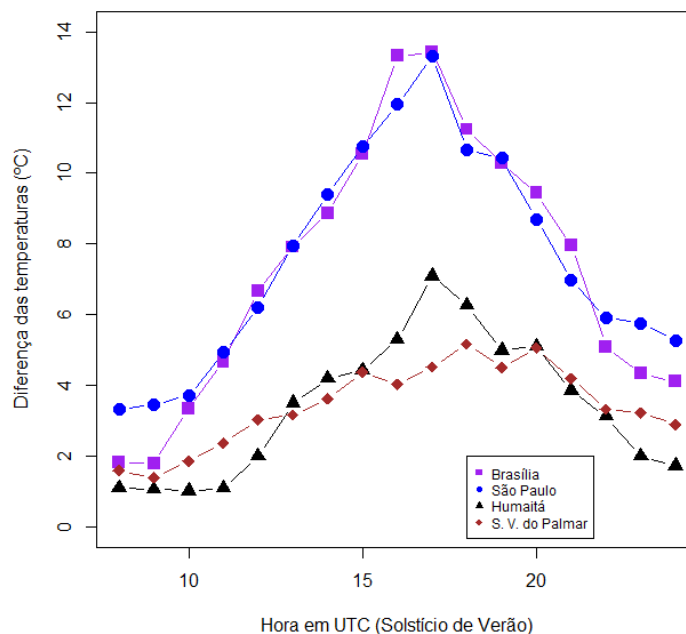
Fonte: Do autor (2023).

Figura 4.51 – Média horária da diferença entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho, em  $^{\circ}\text{C}$ , no Equinócio de Primavera no período 2018-2022.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 4.52 – Média horária da diferença entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho, em °C, no Solstício de Verão no período 2018-2022.



Fonte: Do autor (2023).

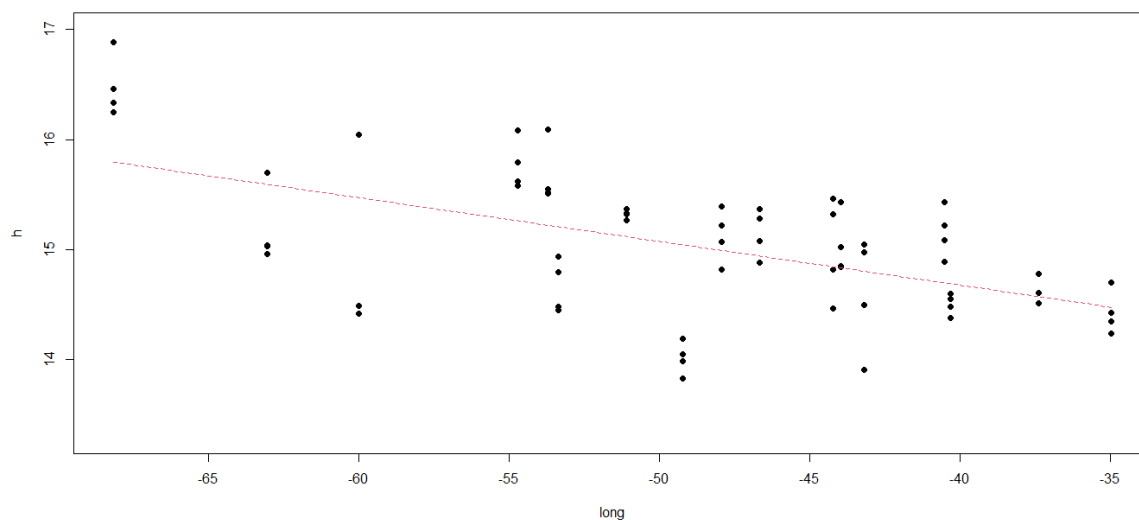
A diferença entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho (em °C) apresenta valores menores em Humaitá e Santa Vitória do Palmar, especialmente nas primeiras horas da manhã durante o solstício de inverno e nos equinócios (Figuras 4.49, 4.50 e 4.51), e ao longo de todo o dia no solstício de verão (Figura 4.52).

As características comuns das cidades em que o Modelo Gompertz apresentou melhor ajuste em comparação ao Modelo Logístico foram: índices pluviométricos extremamente baixos (Santa Vitória do Palmar) ou extremamente altos (Humaitá); temperaturas do ponto de orvalho muito elevadas ao longo do dia (Humaitá) ou muito baixas nas primeiras horas da manhã (Santa Vitória do Palmar); umidade relativa do ar elevada ao longo do dia; e menores diferenças entre a temperatura do ar (bulbo seco) e a temperatura do ponto de orvalho.

#### 4.6.4 Abscissa do ponto de inflexão e longitude

A correlação entre a abscissa do ponto de inflexão e a longitude é -0,5565, classificada como correlação negativa moderada, conforme ilustrado na Figura 4.53. Os parâmetros da regressão estão apresentados na Tabela 4.26.

Figura 4.53 – Gráfico de dispersão das abscissas dos pontos de inflexão e das longitudes.



Fonte: Do autor (2023).

Tabela 4.30 – Parâmetros da regressão linear da abscissa do ponto de inflexão, parâmetro  $\beta$  (em UTC) e da longitude (em grau), com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	12,729344	13,092020	13,454696
$A_1$	-0,046943	-0,039655	-0,032367

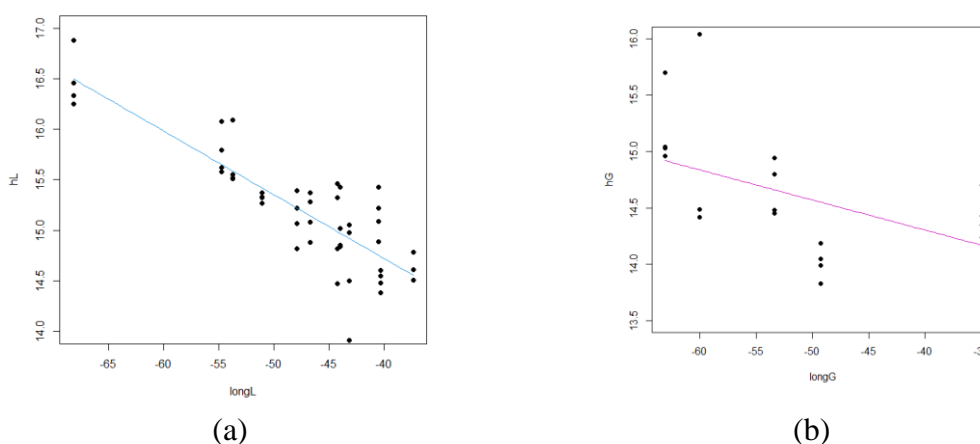
Fonte: Do autor (2023).

A função (4.9) permite calcular, com 95% de confiança, parâmetro  $\beta$  do Modelo Logístico ou Modelo Gompertz para cidades brasileiras localizadas entre as longitudes ( $long$ )  $-68,1653^0$  e  $-34,9592^0$ :

$$\beta = 13,092020 - 0,039655 \times long. \quad (4.9)$$

O Modelo Gompertz translada a abscissa do ponto de inflexão em -1 UTC em relação à estimativa do Modelo Logístico (item 4.1). Portanto, para melhorar a qualidade do ajuste da regressão, optou-se por estratificar as estimativas dos dois modelos, conforme mostrado na Figura 4.54.

Figura 4.54 – Gráfico de dispersão das abscissas dos pontos de inflexão e das longitudes, estratificado por tipo de modelo: Modelo Logístico (a) e Modelo Gompertz (b).



Fonte: Do autor (2023)

As abscissas dos pontos de inflexão do Modelo Logístico e a longitude têm um coeficiente da correlação de  $-0,8607$ , classificada como correlação negativa forte. Os parâmetros da regressão estão na Tabela 4.27.

Tabela 4.31 – Parâmetros da regressão linear da abscissa do ponto de inflexão (em UTC) e da longitude (em graus), Modelo Logístico, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	11,929822	12,195782	12,461742
$A_1$	-0,068613	-0,063110	-0,057607

Fonte: Do autor (2023).

A função (4.10) permite calcular, com 95% de confiança, o parâmetro  $\beta$  do Modelo Logístico para cidades brasileiras localizadas entre as longitudes ( $long$ )  $-68,17^0$  e  $-37,37^0$ . Nesta função, o parâmetro é denotado por  $\beta_L$ :

$$\beta_L = 12,268194 - 0,061967 \times long. \quad (4.10)$$

As abscissas dos pontos de inflexão do Modelo Gompertz e a longitude têm um coeficiente da correlação de  $-0,4925$ , classificada como correlação negativa moderada. Os parâmetros da regressão estão na Tabela 4.28.

Tabela 4.32 – Parâmetros da regressão linear da abscissa do ponto de inflexão (em UTC) e da longitude (em graus), Modelo Gompertz, com intervalos de confiança de 95%.

Parâmetro	L.inf.	Estimativa	L.sup.
$A_0$	12,64712	13,23668	13,82624
$A_1$	-0,03779	-0,02668	-0,01557

Fonte: Do autor (2023).

A função (4.11) permite calcular, com 95% de confiança, o parâmetro  $\beta$  do Modelo Gompertz para cidades brasileiras localizadas entre as longitudes ( $long$ )  $-63,07^0$  e  $-34,96^0$ . Na função, o parâmetro é denotado por  $\beta_G$ :

$$\beta_G = 13,23668 - 0,02668 \times long. \quad (4.11)$$

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que o Modelo Logístico se ajustou melhor em 43 dos 68 conjuntos de dados, enquanto o Modelo Gompertz se destacou em 25. O Modelo von Bertalanffy, embora tenha atendido aos pressupostos, apresentou os piores resultados nos critérios de seleção, e o Modelo Richards não convergiu. O Modelo Gompertz tende a superestimar o parâmetro assintótico e a deslocar a abscissa do ponto de inflexão em menos um UTC em relação ao Modelo Logístico. O Modelo Logístico mostrou-se mais adequado para ajustar os dados de irradiação global acumulada diária no nível do solo. O valor assintótico estimado por este modelo representa a irradiação máxima local, ou seja, fornece o máximo de energia disponível em cada contexto. O fluxo de irradiação solar é máximo no ponto de inflexão, e entre os pontos de máxima e mínima aceleração, a energia acumulada apresenta um comportamento aproximadamente linear.

O resultado da regressão linear entre a abscissa do ponto de inflexão e a longitude indica uma correlação negativa moderada quando são considerados os resultados dos dois modelos. Quando estratificados por modelo, a correlação é negativa forte para o Modelo Logístico e negativa moderada para o Modelo Gompertz. A regressão linear entre o valor estimado do parâmetro assintótico e a latitude apresenta uma correlação positiva muito fraca no Equinócio de Outono, positiva forte no Solstício de Inverno, positiva moderada no Equinócio de Primavera e negativa moderada no Solstício de Verão.

No Bioma Mata Atlântica, a regressão linear entre a abscissa do ponto de inflexão e a longitude é muito fraca, mas ao analisar apenas os parâmetros do Modelo Logístico, a correlação é negativa forte. A correlação entre o parâmetro assintótico e a latitude é positiva muito forte no Equinócio de Primavera, e positiva forte para os Solstícios e o Equinócio de Outono. A correlação entre o parâmetro que determina a velocidade de crescimento e o parâmetro assintótico é negativa forte.

## **6 TRABALHOS FUTUROS**

Realizar estudos sobre a irradiação global acumulada diária no nível do solo, utilizando modelos não lineares em um bioma específico, e correlacionar os parâmetros desses modelos com dados meteorológicos.

## REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, Argentino José; MELLO FILHO, José Américo. **Introdução à Cartografia**. 2. ed. Santa Maria: UFSM, 2009. Disponível em: [https://www.academia.edu/22347861/INTRODUÇÃO\\_À\\_CARTOGRAFIA\\_ARGENTINO\\_JOSÉ\\_AGUIRRE\\_JOSÉ\\_AMÉRICO\\_D\\_E\\_MELLO\\_FILHO](https://www.academia.edu/22347861/INTRODUÇÃO_À_CARTOGRAFIA_ARGENTINO_JOSÉ_AGUIRRE_JOSÉ_AMÉRICO_D_E_MELLO_FILHO). Acesso em: 7 abr. 2021.
- ALVES, C. Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. **Química Nova**. 2005, v. 28, n. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500025>. Acesso em: 12 out. 2022.
- ALVES, Pericles Vale; REIS, Luiz Henrique Souza do; GOIS, Douglas Almeida. Estudo do potencial energético solar em Humaitá-AM, baseado em dados de radiação da estação automática do INMET. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. **Anais eletrônicos [...]**. Gramado-RS. Disponível em: <https://doi.org/10.59627/cbens.2018.693>. Acesso em: 06 nov. 2022.
- ANDRADE, Rênio Leite de; SILVA, Fernando Moreira da. Comportamento energético do sistema vegetação: atmosfera no bioma caatinga. **Sociedade e Território**, v. 25, n. 2, p. 17–28, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/3521>. Acesso em: 13 fev. 2024.
- ANJOS, Enio dos. **Dualidade onda-partícula da luz: uma abordagem para o ensino médio**. Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/214666>. Acesso em: 10 abr. 2020.
- ARAÚJO FILHO, João Ambrósio de. **Manejo pastoril sustentável da caatinga**. Recife, PE: 2013. E-book (200 p.) (Projeto Dom Hélder Câmara). ISBN 978-85-64154-04-9. Disponível em: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/4209>. Acesso em: 12 out. 2022.
- ASSIS FILHO, Jaime Florêncio de. Deuses da mitologia Greco-Romana. **Revista do Clube Naval**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 396, p. 22-27, 2020. Disponível em: <https://www.portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/clubenaval/article/view/6041/5776>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- ASSIS, J. P. de et al. Ajuste de seis distribuições densidade de probabilidade à séries históricas de radiação solar, em Mossoró, RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 5, n. 4, p. 228-237, 2010. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7459669>. Acesso em: 22 jul. 2023.
- Atlas Solarimétrico do Brasil**: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p. : il., tab., mapas. Disponível em: [https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf). Acesso em: 14 ago. 2021.
- BACAËR, N. **A short history of mathematical population dynamics**. London: Springer, 2011. Verhulst and the logistic equation (1838). DOI: 10.1007/978-0-85729-115-8. Disponível em: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/55666/1/56.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2020.

BARBOZA, Eliezio Nascimento; BEZERRA NETO, Francisco das Chagas; CAIANA, Clarice Ribeiro Alves. Sensoriamento Remoto aplicado à análise do fenômeno de Ilhas de Calor Urbano na cidade de Vitória, Espírito Santo. **Research, Society and Development**, [S. l.] v. 9, n. 6, e187963655, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i6.3655>. Acesso: 3 jan. 2024.

BEDAQUE, Paulo; BRETONES, Paulo Sergio. Variação da posição de nascimento do Sol em função da latitude. **Revista Brasileira De Ensino De Física**, 38(3), e3307, 2016. DOI: 10.1590/1806-9126. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/7KxmyjMBkxw5DR TqMWd9GJR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 jan. 2024.

BELÚCIO, Liana Pereira et al. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá-AP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 494–504, out. 2014. DOI: 10.1590/0102-778620130079. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/pD8ZJN9 LPWZjxyg9Nn7KSYQ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 28 mar. 2023.

BERTALANFFY, L. V. Quantitative laws in metabolism and growth. The quarterly review of biology, **American Institute of Biological Sciences**, v. 32, n. 3, p. 217–231, 1957. DOI: 10.1086/401873. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/epdf/10.1086/401873>. Acesso em: 8 mai. 2022.

BEZERRA, L. G. da S.; SARAIVA, A. L. B. da C.; GRIGIO, A. M.. Estudo microclimático em áreas externas de convivência social do Campus Central da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. **Revista GeoSertões (Unageo-CFP-UFCG)**, vol, v. 4, n. 7, 2019. DOI: 10.5281/zenodo.10689857. Disponível em: <http://revistas.ufcg.edu.br/cfp/index.php/geosertoes/index>. Acesso em: 15 set. 2023.

BORBA, Anderson Adaime. **Métodos iterativos e multigrid**. 2004. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Pós-Graduação em Matemática e Computação Científica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/86939>. Acesso em: 9 out. 2021.

BRITO, Cícero Carlos Ramos de et al. Modelos de crescimento resultantes da combinação e variações dos modelos de Chapman-Richards e Silva-Bailey aplicados em *leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. **Ciência Florestal**. Universidade Federal de Santa Maria, v. 17, n. 2, 2007. DOI: 10.5902/198050981949. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/1949>. Acesso em: 25 abr. 2022.

BURIOL, Galileo Adeli et al. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria - RS. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1563–1567, set. 2012. ISSN: 1678-4596. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/fmwzyGgycdphnVwGfRND85M/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 2 jun. 2023.

CALEGARIO, Natalino et al. Desenvolvimento de um modelo linear de efeito misto na estimativa do crescimento e produção de povoamentos clonais de *eucalyptus*. **Cerne**, 10(1), 67-86, 2004. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/744/74410107.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2023.

CARGNELUTTI FILHO, Alberto; MATZENAUER, Ronaldo; TRINDADE, Júlio Kuhn da. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio

Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 12, p. 1157–1166, dez. 2004. DOI: 10.1590/S0100-204X2004001200001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/dZPKz5F35xtgdmHfHTGq6xf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 29 nov. 2022.

CARVALHO, D. F. de et al. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica - RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 838–844, ago. 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011000800011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/cKnjH77x4rnshnyndvXbySt/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 out. 2022.

CEPEL – CRESESB. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: [https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf). Acesso em: 17 jan. 2021.

COUTINHO, Leopoldo Magno. O conceito de bioma. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 1, p. 13–23, jan. 2006. DOI: 10.1590/S0102-33062006000100002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abb/a/RhxPXykYPBPbCQCxz8hGtSn/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 jul. 2022.

DELGADO, R. C. et al. Cenários climáticos da radiação solar global baseados no modelo regional HadRM3 para o Estado do Acre. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 417-428, 2014. DOI: 10.1590/S0102-33062006000100002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abb/a/RhxPXykYPBPbCQCxz8hGtSn/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 4 set. 2021.

DEMÉTRIO, Clarice Garcia Borges; ZOCCHI, Sílvio Sandoval. **Modelos de regressão**. São Paulo: Piracicaba, 2011. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1712653/mod\\_resource/content/1/apostila.da.disciplina.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1712653/mod_resource/content/1/apostila.da.disciplina.pdf). Acesso em: 21 ago. 2020.

DORNELAS, D. E. S.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C. A. DA S.. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 8, p. 1213-1219, 2006. DOI: 10.1590/S0100-204X2006000800001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/Tqrn9GmhDxZqvSQFYJTfs5P/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 5 mai. 2021.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. DOI: 10.1002/9781118625590. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118625590>. Acesso em: 23 jun. 2022.

DRECHMER, Patrícia Aparecida de Oliveira; RICIERI, Reinaldo Prandini. Irradiação global, direta e difusa, para a região de Cascavel, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 28, n. 1, p. 73-77, 2006. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3032/303226515011.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2022.

DUARTE, Alejandro Fonseca. Aspectos da climatologia do Acre, Brasil, com base no intervalo 1971-2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 308-317, 2006. Disponível em: [https://www.acrebioclima.net/abcpublications/Environment\\_and\\_Health/LBA023-2006\\_AFDuarte.pdf](https://www.acrebioclima.net/abcpublications/Environment_and_Health/LBA023-2006_AFDuarte.pdf). Acesso em: 29 nov. 2020.

Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2020**: ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2020. 292p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\_sppdf.  
Acesso em: 25 jun. 2022.

Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2023**: ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2024.

ESPÍNOLA SOBRINHO, José et al. Climatologia da precipitação no município de Mossoró-RN. Período: 1900–2010. In: **XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. 2011. Disponível em: <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/3624.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2023.

ESTEFANEL, Valduíno et al.. Insolação e radiação solar na região de Santa Maria, RS: estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, 20(3-4): 203-216, 1990. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/257562/000168256.pdf?sequence=1>. Acesso em: 26 ago. 2022.

FAGUNDES, Arian Rodrigues. **Avaliação do potencial de geração e viabilidade econômica de usinas solares no Brasil**. 2019. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/handle/riu/4210>. Acesso em: 12 mai. 2021.

FEITOSA, Francisco Emenson Carpegiane Silva et al. Influência das Mudanças de Tempo e Variabilidade Climática Sobre a Produção de Energia Fotovoltaica no Estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2017, 10.06: 1959-1973. DOI: 10.26848/rbgf.v10.6.p1959-1973. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/234182/pdf>. Acesso em: 19 set. 2020.

FERNANDES, D. S. et al.. Estimativa da Radiação Solar Global com Base em Observações de Temperatura para o Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 558–566, jul. 2018. DOI: 10.1590/0102-7786333014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/CQY7t93br5LkDzbSpCTMgCg/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 29 jan. 2022.

FERNANDES, Jaqueline Gonçalves. **Modelos não lineares duplo sigmoidais**: uma aplicação para descrição do crescimento de frutos do pessegueiro. 2020. 103 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/42514>. Acesso em: 6 ago. 2022.

FERNANDES, Tales Jesus et al. Parameterization effects in nonlinear models to describe growth curves. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 37, n. 4, p. 397–402, 2015. Disponível em <https://www.redalyc.org/pdf/3032/303241625011.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2022.

FERNANDES, T. J. et al. Seleção de modelos não lineares para a descrição das curvas de crescimento do fruto do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 207–215, 2014. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8029>. Acesso em: 14 out. 2022.

FERNANDES, Tales Jesus. **Curva de crescimento do fruto do cafeeiro em diferentes alinhamentos de plantio utilizando modelos não lineares**. 2012. Dissertação (Mestrado em

Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/745>. Acesso em: 14 out. 2022.

FERREIRA, Williams Pinto Marques. **Radiação solar em Sete Lagoas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 21 p. ISSN 1518-4277. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/490426/1/Doc58.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2021.

FREITAS, Alfredo Ribeiro de. Curvas de crescimento na produção animal. **Revista Brasileira Zootecnia**, v. 34, n. 3, p. 786–795, 2005. DOI: 10.1590/S1516-35982005000300010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbz/a/rHfSnXSdtRdPcDqYwVxTwsF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 4 out. 2023.

FRÜHAUF, Ariana Campos. **Uso de modelos não lineares no estudo do crescimento diamétrico de cedro (Cedrela fissilis)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/29741>. 21 jun. 2021.

GÓMEZ, Jenny Marcela Rodrigues et al. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. 2018, v. 40, n. 3. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/DfZGpdWH53yHvvj9kwjMqq/?lang=pt>. Acesso em: 21 jul. 2022.

GOTARDO, Rafael et al.. Comparação entre variáveis microclimáticas de local aberto e florestal em um bioma da Mata Atlântica, sul do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1415–1427, jul. 2019. DOI: 10.5902/1980509834832. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/34832/pdf>. Acesso em: 9 dez. 2021.

HERNANDES, José Luiz; PEDRO JÚNIOR, Mário José; BARDIN, Ludmila. Variação estacional da radiação solar em ambiente externo e no interior de floresta semidecídua. **Revista Árvore**, v. 28, n. 2, p. 167–172, mar. 2004. DOI: 10.1590/S0100-67622004000200002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/nL9rDSPzCJwjRhg76JMxPsy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 out. 2023.

HOFFMANN, Rodolfo. **Análise de regressão: uma introdução à econometria**. 5. ed. Piracicaba, 2015. DOI: 10.11606/9788592105709. Disponível em: [https://www.esalq.usp.br/biblioteca/sites/default/files/Analise\\_Regress%C3%A3o.pdf](https://www.esalq.usp.br/biblioteca/sites/default/files/Analise_Regress%C3%A3o.pdf). Acesso em: 8 abr. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil**: compatível com a escala 1:250 000. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf>. Acesso em: 4 mai. 2021.

Instituto Nacional de Meteorologia. **Históricos de dados meteorológicos (2000/2022)**. DF: Brasília, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 17 jul. 2023.

LEITE, José Lourenço Araújo. **Do simbólico ao racional-ensaio sobre a gênese da mitologia grega como introdução à filosofia**. Salvador: EGBA, 2001. Disponível em: <http://www.repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/3744>. Acesso em: 23 mai. 2020.

LEITHOLD, Louis. **O cálculo com geometria analítica**. 3.ed. São Paulo: Habra, 1994. Disponível em: [http://www.eletrica.ufpr.br/armando/index\\_arquivos/](http://www.eletrica.ufpr.br/armando/index_arquivos/). Acesso em: 19 jun. 2020.

LIMA, Kelly Pereira de et al. Uso de modelos não lineares na descrição do acúmulo de boro em diferentes partes do feijoeiro cultivar jalo. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 35, n. 4, p. 834–861, 2017. ISSN: 2764-5290. Disponível em: <http://ftpnucleo.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/117/135>. Acesso em: 27 abr. 2021.

LUCHINI, Matheus Bassani; ALVARENGA, Laryssa Souza; GUIMARÃES, Warley Teixeira. Crescimento da energia fotovoltaica e a evolução do tema nos cursos de engenharia elétrica no Espírito Santo. *In*: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, [S. l.], 2020, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza, CBENS, 2020 DOI: 10.59627/cbens.2020.1031. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1031>. Acesso em: 22 set. 2022.

MACEDO JUNIOR, Marcelo Alberto Vieira; JESUS, Vitor Luiz Bastos de. Refração luminosa em recipientes preenchidos parcialmente com água: análise de problemas e proposta experimental. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. 2017, v. 39, n. 3. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0222. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/HWKg6RpnCDx55kv4SW3NsGw/#>. Acesso em: 12 out. 2022.

MACEDO, Alice dos Santos; FISCH, Gilberto. Variabilidade Temporal da Radiação Solar Durante o Experimento GOAmazon 2014/15. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 353–365, abr. 2018. DOI: 10.1590/0102-7786332017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/FXTDwZB6hWzgyJbRYdDBTbs/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MAIA, Emanuel et al. Método de comparação de modelos de regressão não-lineares em bananeiras. **Ciência Rural**, v. 39, n. 5, p. 1380–1386, ago. 2009. DOI: 10.1590/S0103-84782009000500012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/kZJHfFfBdpK6wcspK4B5RL/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 13 fev. 2024.

MANIÇOBA, Rudah Marques et al. Índice de anomalias de chuva para diferentes mesorregiões do Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 4, p. 1110-1119, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1082984/1/Indicedeanomaliasdechuva....pdf>. Acesso em: 23 mar. 2021.

MARCIOTTO, Edson Roberto; OLIVEIRA, Amauri Pereira de; ESCOBEDO, João Francisco. Comparação entre a radiação solar medida na superfície e estimada por satélite na região metropolitana de São Paulo. *In*: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2008. DOI: 10.59627/cbens.2008.1314. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1314/1312>. Acesso em: 31 mai. 2021.

MARGARIDO, Gustavo Neves; FRAJUCA, Carlos; BORTOLI, Fábio da Silva. Avaliação de medição da umidade relativa do ar pelo método do ponto de orvalho usando materiais acessíveis e sistema de controle convencional. **Revista Sinergia**, v. 20, n. 4, 2019. Disponível em: <https://ojs.ifsp.edu.br/index.php/sinergia/article/view/708>. Acesso em: 12 jun. 2023.

MARQUES FILHO, Arí de Oliveira; DALLAROSA, Ricardo Godinho; PACHÊCO, Vanusa Bezerra. Radiação solar e distribuição vertical de área foliar em floresta. Reserva Biológica do

Cuieiras ZF2, Manaus. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 4, p. 427–436, out. 2005. DOI: 10.1590/S0044-59672005000400007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/Tpj95mYM5nYMJHmptX8WJ4G/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 4 nov. 2022.

MARQUES, Derivan Dutra et al.. Variação da radiação solar no estado do Amapá: estudo de caso em Macapá, Pacuí, Serra do Navio e Oiapoque no período de 2006 a 2008. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 127–138, jul. 2012. DOI: 10.1590/S0102-77862012000200002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/L8s56D5xSbFwZ98Cv69t8tx/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 6 out. 2022.

MARTINS, Paulo André da Silva et al. Verificação da turbidez atmosférica em Humaitá-AM. **Revista EDUCamazônia**. 12. 86-98. ano 7, v. 12, nº1, Jan-Jun, 2014, Pág. 86-98. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/262068534>. Acesso em: 04 fev. 2024.

MAUAD, Frederico Fábio; FERREIRA, Luciana da Costa; TRINDADE, Tatiana Costa Guimarães. **Energia renovável no Brasil: análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras**. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, 2017. *E-book*. Disponível em: [www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/168](http://www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/168). Acesso: 9 jan. 2024.

MAZUCHELI, Josmar; ACHCAR, Jorge Alberto. **Algumas considerações em regressão não linear**. *Acta Scientiarum*, 2002, 24.6: 1761-1770. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/2551/1574>. Acesso: 16 set. 2022

MENDONÇA, Ednaldo Araújo. **Análise da precipitação nas mesorregiões do Estado de Pernambuco**. Campina Grande: PB, 2016. 106 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1438>. Acesso em: 6 ago. 2022.

MOREIRA, Andreise; KUPLICH, Tatiana Mora; FONSECA, Eliana Lima da. A variação fenológica de tipologias campestres do bioma Pampa pela abordagem ondaleta. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 1584, 2011. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/06.22.18.03/doc/p0216.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

MUNIZ, Joel Augusto; NASCIMENTO, Mirchelania da Silva; FERNANDES, Tales Jesus. Nonlinear models for description of cacao fruit growth with assumption violations. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 250–257, 2017. DOI: 10.1590/1983-21252017v30n128rc. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/zJ7GF7YPJ7WP47Rr8rscgwL/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 28 abr. 2022.

MUYLAERT, Renata Lara et al.. Uma nota sobre os limites territoriais da Mata Atlântica. **Oecologia Australis**, v. 22, n. 3, 2018. DOI: 10.4257/oeco.2018.2203.09. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/oa/article/view/14317>. Acesso em: 8 ago. 2022.

NASCIMENTO, Diego Tarley Ferreira; NOVAIS, Giuliano Tostes. Clima do Cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. **Eliséé**, v. 9, n. 2, p. e922021, 2020. DOI: 10.31668/elisee.v13i01. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/elisee/article/view/10854>. Acesso em: 14 nov. 2021.

NEGRÃO, Oscar Braz Mendonza. Movimentos da terra e clima. **Ciências em Foco**, v. 1, n. 1, 2008. e-ISSN: 2178-1826. Disponível em: <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/cef/article/view/9164>. Acesso em: 21 jun. 2021.

OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco et al.. Caracterização do regime de vento no município de Seropédica, Rio de Janeiro (2001-2010). **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 4, p. 447-459, out. 2013. DOI: 10.4322/floram.2013.040. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/Dw48j6MHRXpYqYT5pDnV39z/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 mai. 2022.

OLIVEIRA, Fernanda Tavares Vasconcelos; MALAGÓN, Luis Arturo Gómez. Otimização do ângulo de inclinação e orientação de painéis solares para a cidade de Petrolina. *In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. 2018. DOI: 10.59627/cbens.2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/717>. Acesso em: 25 jan. 2023.

OLIVEIRA, Leydimere Janny Cota. **Cenários futuros para a Amazônia**: interações entre o desmatamento, as mudanças climáticas, o ecossistema natural e os sistemas agrícolas. 2012. 196 f. Tese (Doutorado em Agrometeorologia; Climatologia; Micrometeorologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. Disponível em: <https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/dac6ba20-65a5-4476-98ba-d01df6affa3b/content>. Acesso em: 15 mai. 2022.

OLIVEIRA, Sérgio Henrique Ferreira de; MATOS, José Gomes de; SAAVEDRA, Osvaldo Ronald. A geração solar e eólica como vetor de desenvolvimento sócio-econômico em comunidades isoladas no maranhão: o projeto da Ilha dos Lençóis. *In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. 2007. DOI: 10.59627/cbens.2007. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1743/1734>. Acesso em: 2 jun. 2020.

OLIVEIRA, Soetânia Santos de; CAVAZZANA, Guilherme Henrique; SOUZA, Amaury de. Estimativa da radiação solar global em função da temperatura do ar e isolinhas para o Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 6, n. 12, p. 93-108, 2019. Disponível em: <http://revista.ecogestaobrasil.net/v6n12/v06n12a07a.html>. Acesso em: 17 ago. 2022.

PAIVA, Edinei Canuto. Energia Solar, no topo da atmosfera, ao nível do solo e simulações. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 03, ed. 12, Vol. 07, pp. 51-68, 2018. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-agricola/no-topo-da-atmosfera>. Acesso em: 07 jan. 2024.

PEREIRA, Lucio Alberto et al. de. **Influência do clima no balanço hídrico de dois açudes de Petrolina, Pernambuco**. *In: SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO*, 4., 2015, Petrolina. Experiências e oportunidades para o desenvolvimento. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1017620/1/431.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2022.

PORTO, Walter Accioly Costa. **A utilização da estatística experimental em indústrias da grande Salvador e seu ensino**. 2014. 245 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/4462>. Acesso em: 7 jan. 2021.

PRUDENTE, Andréa Andrade. **Modelos não-lineares de regressão**: alguns aspectos de teoria assintótica. 2009. 109 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede/handle/tede2/4480>. Acesso em: 15 jul. 2022.

QUERINO, Carlos Alexandre Santos et al. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (kt), externo e interno, em uma floresta de mangue em Alagoas - Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 204–214, jun. 2011. DOI: 10.1590/S0102-77862011000200005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/vj8gfY6zLhnVmm6JsBQ8Z8x/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 6 set. 2020.

RAPOSO, André de Almeida Pereira Nunes. **Efeito do ângulo de incidência na medida da irradiância solar**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/48657>. Acesso em: 15 set. 2022.

RIBEIRO, Maria de Nazaré Góes et al. Radiação solar disponível em Manaus (AM) e sua relação com a duração do brilho solar. **Acta Amazonica**, v. 12, n. 2, p. 339–346, abr. 1982. DOI: 10.1590/1809-43921982122339. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/DgCj37kV7fWwNGjsqv4Tgw/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 mai. 2021.

RIVELINO, Roberto. Sob a luz do conhecimento. **Revista de Inovação, Tecnologia e Ciências**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Rivelino/publication/299640089\\_Sob\\_a\\_Luz\\_do\\_Conhecimento/links/5703b1108aeade57a25abac/Sob-a-Luz-do-Conhecimento.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Rivelino/publication/299640089_Sob_a_Luz_do_Conhecimento/links/5703b1108aeade57a25abac/Sob-a-Luz-do-Conhecimento.pdf). Acesso em: 13 abr. 2020.

ROSA, Cleci Teresinha Werner da et al. Atividade experimental para demonstração dos fenômenos de reflexão, refração e reflexão total. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 4, n. 1, p. 75-85, 2013. DOI: 10.26843/rencima.v4i1. Disponível em: <https://revistapos.cruzeirodosul.edu.br/rencima/article/view/562/465>. Acesso em: 26 out. 2020.

SALVADOR, Cássia Silva et al. Análise do potencial de geração de energia fotovoltaica em edificação pública de ensino na cidade de Colatina – ES. *In*: XV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E XI ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias, 2019, João Pessoa. **Anais eletrônicos** [...]. João Pessoa, v. 15, p. 2188-2196, 2019. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4265/3161>. Acesso em: 6 mai. 2021.

SALVADOR, Rafaela de Carvalho. **Modelos não lineares na comparação de fertilizantes de liberação controlada aplicados ao cafeeiro**. 2022. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. Disponível em: <http://177.105.2.222:8080/handle/1/55826>. Acesso em: 12 jan. 2024.

SEBER, George Arthur Frederick; WILD, Cristopher Jhon. **Nonlinear regression**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2003. DOI: 10.1002/0471725315. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471725315>. Acesso em: 21 jun. 2020.

SILVA, Édipo Menezes da. **Modelos de regressão na descrição do crescimento de frutos de amora-preta**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. Disponível em <http://repositorio.ufla.br/handle/1/29692>. Acesso em: 19 abr. 2020.

SILVEIRA, Silvio de Castro et al. Modelos não lineares ajustados à produção acumulada de biogás provenientes de camas sobrepostas de suínos. **Revista Agrogeoambiental**, v. 10, n. 3, 2018. DOI: 10.18406/2316-1817v10n320181168. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1168/pdf>. Acesso em: 19 set. 2022.

SOUZA, Juarez Dantas de; SILVA, Bernardo Barbosa da; CEBALLOS, Juan Carlos. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 1, p. 31–44, jan. 2008. DOI: 10.1590/S0102-261X2008000100003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbg/a/w4sK96yG3SV8tyGZVVvQkjk/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 28 abr. 2020.

TAKEBAYASHI, Hideki et al. Study to examine the potential for solar energy utilization based on the relationship between urban morphology and solar radiation gain on building rooftops and wall surfaces. **Revista Solar Energy**. v.119. 2015 p.362-369. DOI: 10.1016/j.solener.2015.05.039. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.039>. Acesso em: 11 jan. 2024.

THOMAS, Gorge Brinton; WEIR, Maurice D.; HASS, Joel. **Cálculo**. v. 1. 11. ed. São Paulo, SP: Pearson, 2009. Disponível em: <https://www.bvirtual.com.br/NossoAcervo/Publicacao/3376>. Acesso em: 5 abr. 2020.

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno; GUERREIRO, Almicar; GORINI, Ricardo. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos estudos CEBRAP**, São Paulo, n. 79, p. 47-69, nov. 2007. DOI; 10.1590/S0101-33002007000300003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/nec/a/HHYKXDgchzv4n4gNfRhqnwK/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 20 jul. 2022.

UMLAUF, Cassiano Ricardo et al. **Estimativa da probabilidade da radiação solar incidente para o estado do Paraná**. [http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes/re.i\\_2018\\_convibra\\_10.pdf](http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes/re.i_2018_convibra_10.pdf). Acesso em: 19 jul. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Biblioteca Universitária. **Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses**. 4. ed. rev., atual. e ampl. Lavras, 2024. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/58728>. Acesso em: 16 mar. 2024.

VICENTE, Isabella Donadon; SILVA, Saulo Luis Lima da. A natureza quântica da luz ea lei de Snell-Descartes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, p. e20230368, 2024. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0368. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/QD7kPZ4HHDxdb7zqt5n63wC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 21 jun. 2021.

VILELA, Olga de Castro et al. Planta fotovoltaica de 3mwp de Petrolina aspectos tecnológicos, legais e ambientais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR - CBENS, 2014, Recife **Anais** [...]. São Paulo: CBENS, 2014. DOI:

10.59627/cbens.2014.1828. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1828>. Acesso em: 29 set. 2022.

VILLA NOVA, Nilson Augusto et al. Radiação solar em Manaus. **Revista Acta Amazonica**, v. 8, n. 3, p. 417–421, jul. 1978. DOI: 10.1590/1809-43921978083421. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/dcchN9VsH6QzGq5RK8VFFrq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 8 set. 2022.

WADT, Lucia Helena de Oliveira et al. **Castanha-da-amazônia**: estudos sobre a espécie e sua cadeia de valor. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1155399>. Acesso em: 12 fev. 2024.

WEBER, Rodrigo; HEIDEMANN, Leonardo Alburquerque; VEIT, Eliane Angela. Atenuação da luz em meios materiais: uma atividade de modelagem envolvendo três experimentos didáticos. **Revista Brasileira de Ensino Física**, São Paulo, v. 42, e20200229, 2020. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0229. Disponível em: [http://old.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172020000100396&lng=en&nrm=iso](http://old.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172020000100396&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 12 out. 2022.

WINSOR, C. P. The gompertz curve as a growth curve. Proceedings of the national academy of sciences, **National Acad Sciences**, v. 18, n. 1, p. 1–8, 1932. DOI: 10.1073/pnas.18.1.1. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.18.1.1>. Acesso em: 25 abr. 2020.

## APÊNDICE A – Dados de irradiação global

### Bioma Mata Atlântica

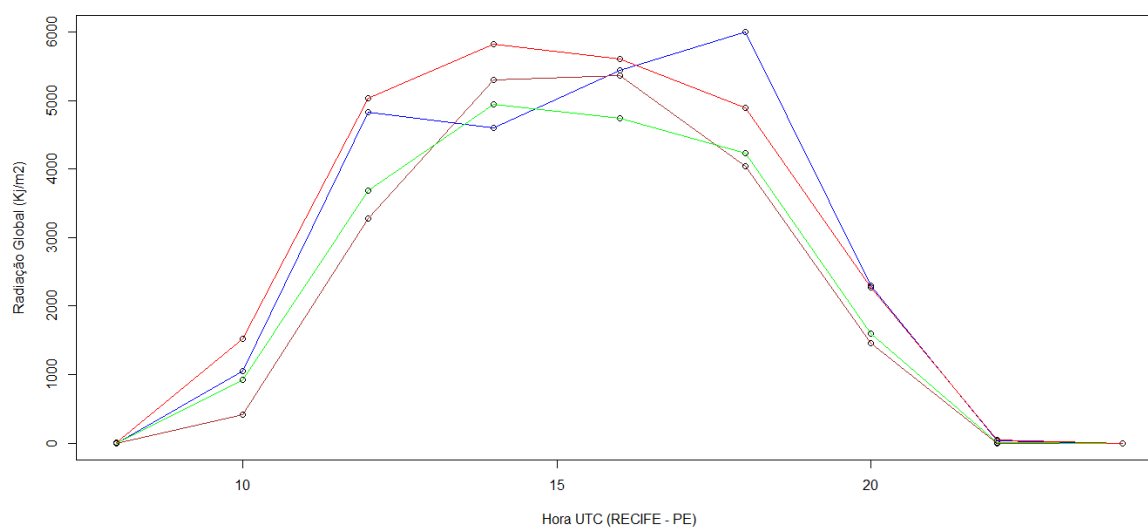
Estação A301 da cidade de Recife – PE: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.1 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A301 na cidade de Recife – PE, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	3,67
10:00	1053,48	411,03	929,23	1521,93
12:00	4832,92	3281,17	3683,75	5035,50
14:00	4598,38	5303,88	4939,80	5820,47
16:00	5443,00	5356,87	4738,52	5607,50
18:00	5997,27	4034,40	4229,98	4895,50
20:00	2301,40	1454,10	1594,27	2269,66
22:00	29,75	2,73	4,68	41,84
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.1 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A301 na cidade de Recife – PE, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

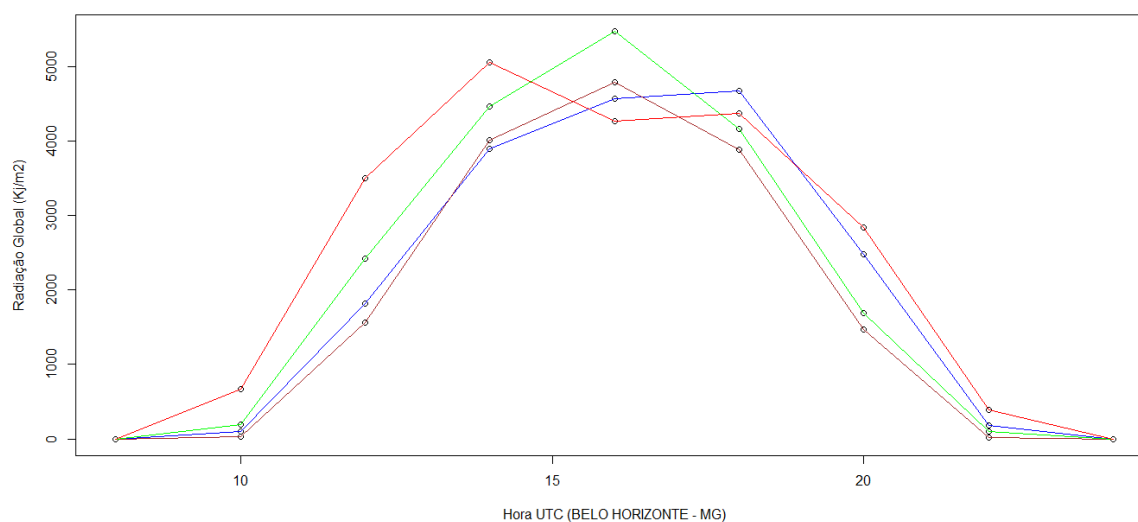
Estação A521 da cidade de Belo Horizonte – MG: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.2 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A521 na cidade de Belo Horizonte – MG, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,04	0,00	0,00	0,00
10:00	106,10	29,76	192,46	668,82
12:00	1817,68	1561,96	2415,62	3499,06
14:00	3893,08	4005,94	4460,36	5051,46
16:00	4563,34	4789,00	5469,12	4268,76
18:00	4665,00	3882,60	4160,24	4367,24
20:00	2482,38	1467,90	1694,36	2836,66
22:00	179,02	15,56	96,42	396,48
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.2 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A521 na cidade de Belo Horizonte – MG, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

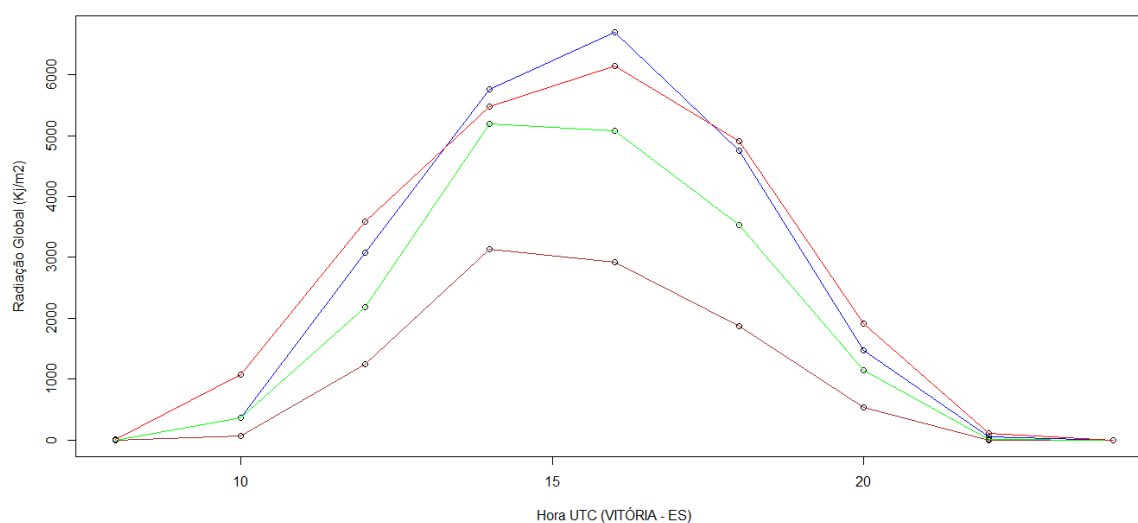
Estação A612 da cidade de Vitória – ES: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.3 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A612 na cidade de Vitória – ES, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	3,44
10:00	366,13	63,23	367,75	1073,80
12:00	3084,10	1246,30	2178,28	3584,48
14:00	5766,17	3136,60	5192,42	5482,78
16:00	6698,67	2919,24	5080,88	6140,52
18:00	4749,16	1870,76	3529,60	4911,46
20:00	1475,57	540,07	1151,27	1908,68
22:00	58,40	0,03	13,10	114,62
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.3 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A612 na cidade de Vitória – ES, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

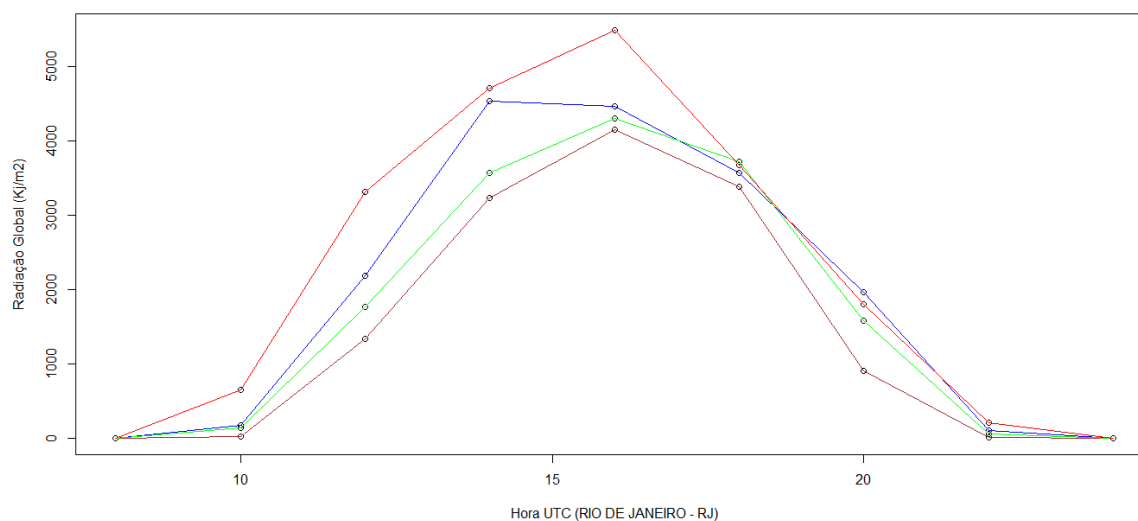
Estação A602 da cidade do Rio de Janeiro – RJ: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.4 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A602 na cidade do Rio de Janeiro – RJ, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	169,82	22,62	134,98	647,22
12:00	2188,54	1331,90	1762,50	3310,56
14:00	4527,60	3233,62	3571,18	4710,38
16:00	4458,84	4152,02	4305,88	5486,20
18:00	3568,94	3387,16	3721,04	3675,18
20:00	1962,74	907,68	1581,68	1804,28
22:00	99,02	3,50	50,98	205,10
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.4 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A602 na cidade do Rio de Janeiro – RJ, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

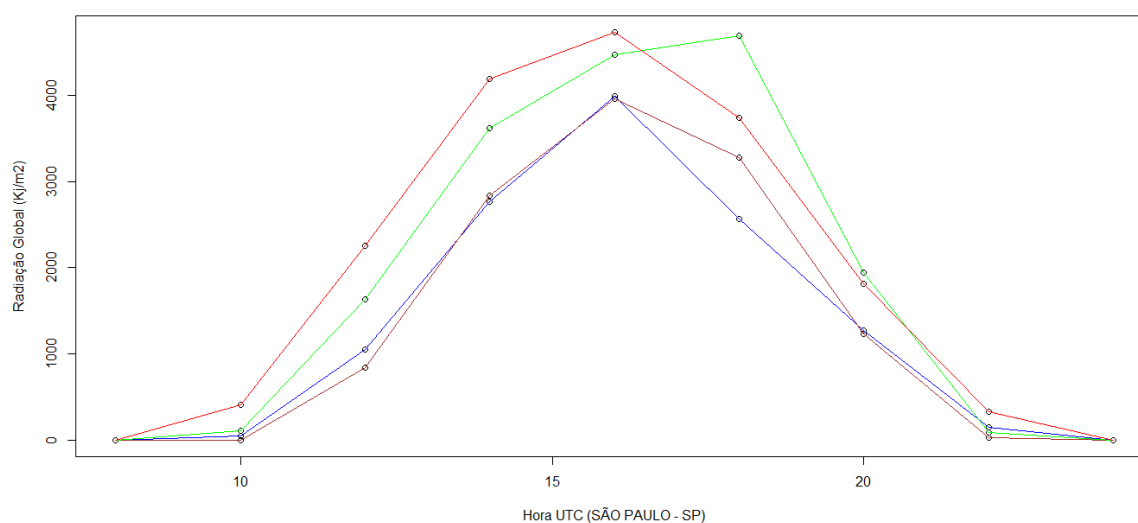
Estação A701 da cidade de São Paulo – SP: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.5 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A701 na cidade de São Paulo – SP, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	48,23	1,36	110,65	406,34
12:00	1052,62	839,40	1634,10	2255,18
14:00	2765,73	2836,06	3616,35	4188,70
16:00	3987,55	3964,86	4474,53	4732,94
18:00	2564,65	3279,92	4689,67	3742,22
20:00	1267,00	1231,94	1939,45	1813,06
22:00	143,57	25,28	90,23	330,72
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.5 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A701 na cidade de São Paulo – SP, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

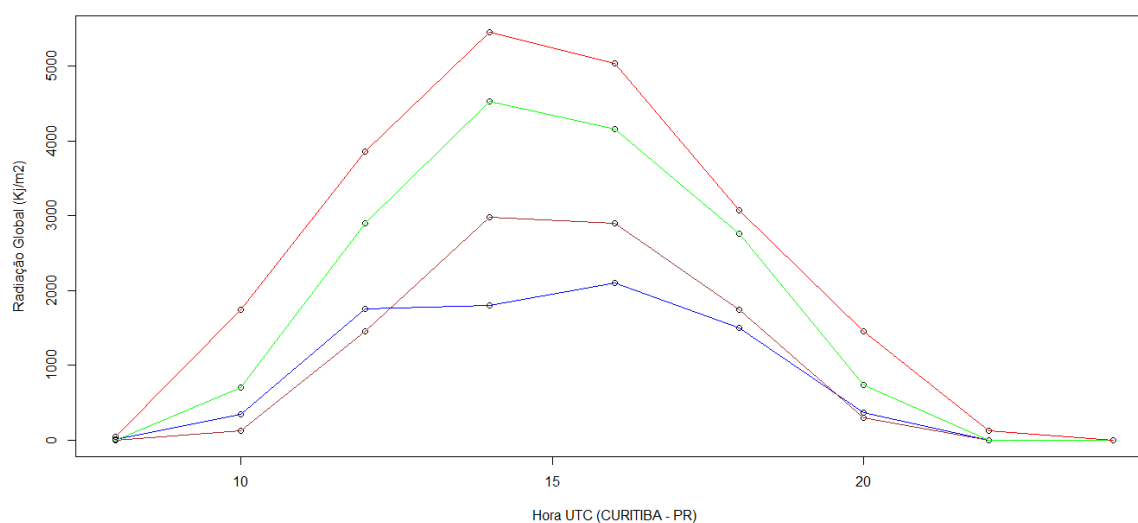
Estação A807 da cidade de Curitiba – PR: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.6 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A807 na cidade de Curitiba – PR, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	1,60	0,00	2,70	46,14
10:00	382,28	133,18	706,95	1743,44
12:00	2591,26	1452,42	3454,36	3861,30
14:00	3018,36	2981,96	4837,76	5453,00
16:00	3777,38	2899,88	4155,03	5043,12
18:00	2976,00	1743,40	3463,52	3068,20
20:00	679,36	292,84	1016,82	1448,46
22:00	2,58	0,00	9,25	119,15
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.6 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A807 na cidade de Curitiba – PR, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

## Bioma Amazônia

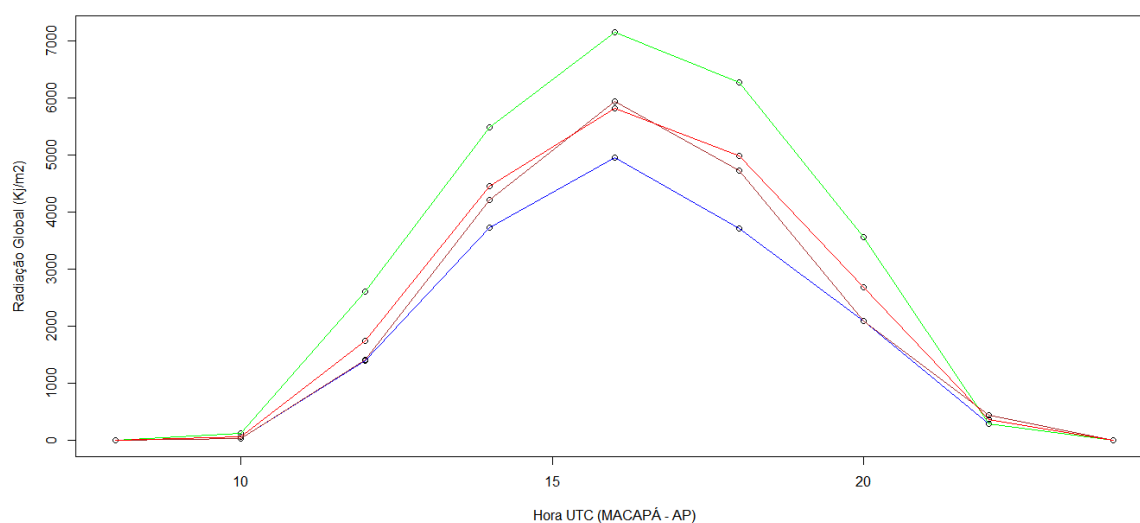
Estação A249 da cidade de Macapá – AP: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.7 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A249 na cidade de Macapá – AP, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	18,98	32,08	114,23	62,47
12:00	1397,30	1409,87	2610,40	1738,03
14:00	3730,32	4215,68	5490,20	4458,10
16:00	4955,80	5943,52	7149,30	5817,63
18:00	3703,68	4718,65	6276,82	4978,24
20:00	2081,25	2094,85	3564,55	2675,10
22:00	291,15	430,88	279,00	352,20
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.7 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A249 na cidade de Macapá – AP, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

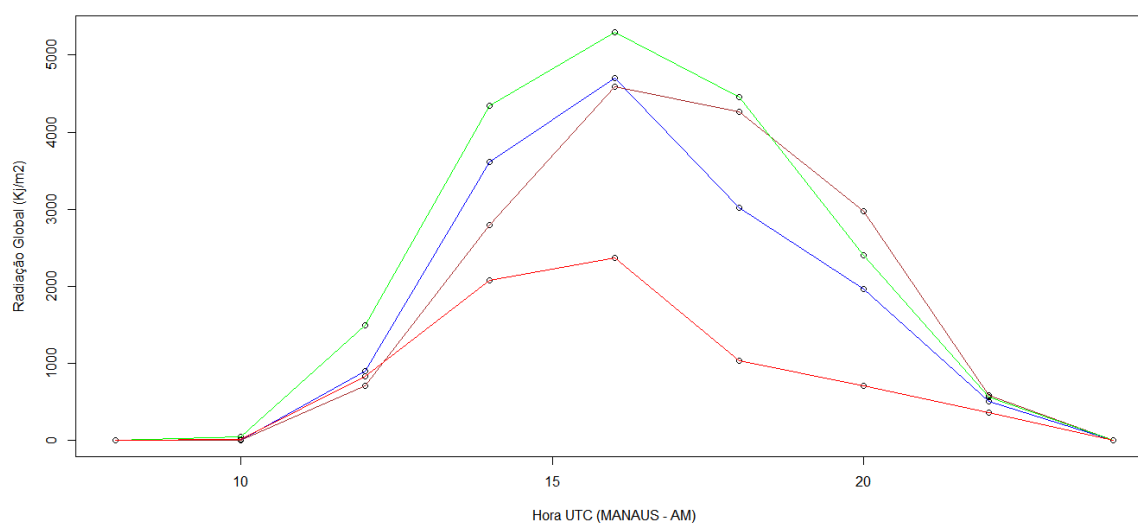
Estação A101 da cidade de Manaus – AM: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo, nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.8 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A101 na cidade de Manaus – AM, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	0,00	0,32	40,08	3,06
12:00	897,70	709,38	1489,80	830,56
14:00	3612,48	2791,38	4340,20	2074,04
16:00	4699,80	4585,12	5296,24	2363,40
18:00	3013,94	4258,46	4455,20	1034,48
20:00	1964,26	2975,04	2397,18	703,56
22:00	504,48	584,78	553,58	352,82
24:00	1,58	0,10	0,00	1,06

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.8 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A101 na cidade de Manaus – AM, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

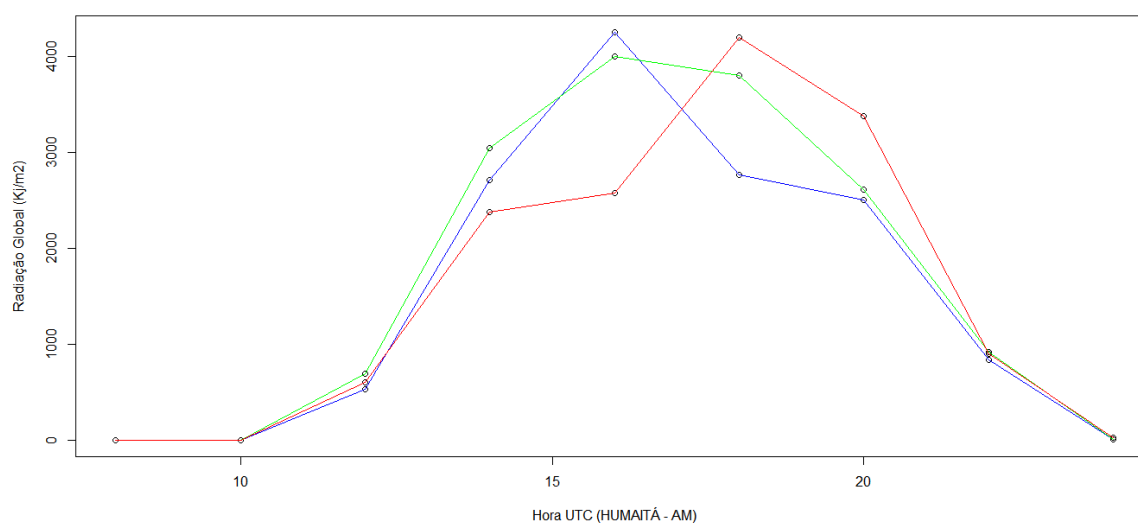
Estação A112 da cidade de Humaitá – AM: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.9 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A112 na cidade de Humaitá – AM, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	0,05	0,63	0,63	0,90
12:00	524,90	694,67	694,67	602,30
14:00	2704,90	3046,90	3046,90	2379,25
16:00	4248,95	3999,63	3999,63	2575,35
18:00	2767,40	3802,47	3802,47	4191,30
20:00	2504,30	2614,10	2614,10	3376,30
22:00	832,55	912,33	912,33	897,50
24:00	8,70	7,87	7,87	24,45

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.9 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A112 na cidade de Humaitá – AM, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

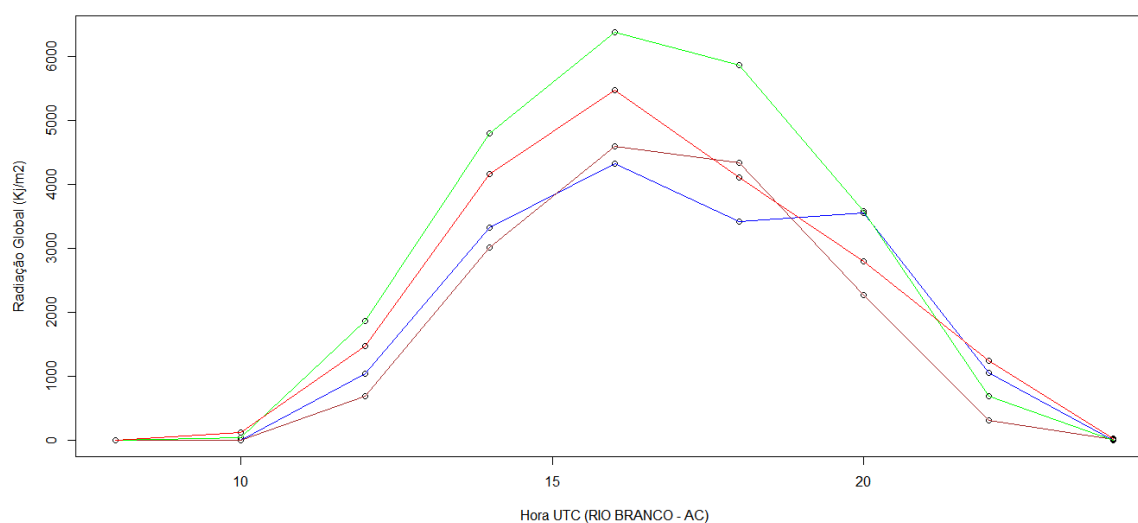
Estação A102 da cidade de Rio Branco – AC: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.10 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ}/\text{m}^2$ , da Estação Meteorológica A102 na cidade de Rio Branco – AC, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ}/\text{m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	2,63	0,00	0,00	0,03
12:00	242,87	494,55	412,90	477,20
14:00	2038,28	2602,70	2540,74	2025,94
16:00	4395,50	5068,60	4492,54	3784,16
18:00	4625,17	5177,55	3732,90	4955,32
20:00	2209,83	2901,75	3215,34	3591,73
22:00	887,37	1475,90	1512,12	1725,34
24:00	36,58	14,65	23,52	88,76

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.10 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ}/\text{m}^2$ , da Estação Meteorológica A102 na cidade de Rio Branco – AC, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

## Bioma Cerrado

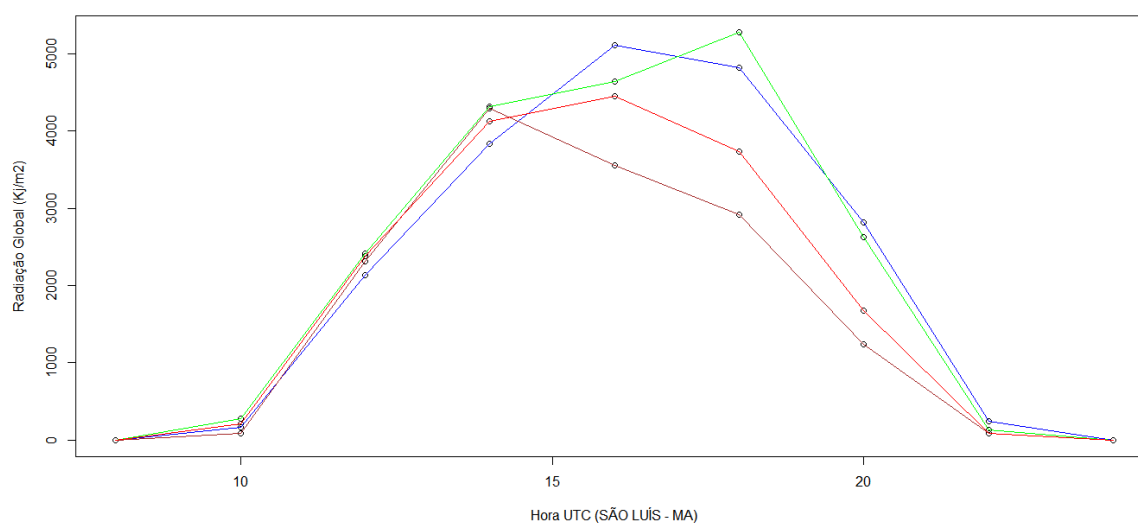
Estação A203 da cidade de São Luís – MA: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.11 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A203 na cidade de São Luís – MA, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	161,80	91,30	279,55	211,05
12:00	2135,60	2314,30	2409,90	2384,20
14:00	3842,15	4290,50	4322,30	4125,25
16:00	5112,90	3556,33	4640,90	4448,05
18:00	4821,20	2914,00	5280,10	3739,85
20:00	2823,10	1244,34	2623,45	1672,80
22:00	238,75	80,90	132,90	83,75
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.11 – Média horária acumulada da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A203 na cidade de São Luís – MA, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

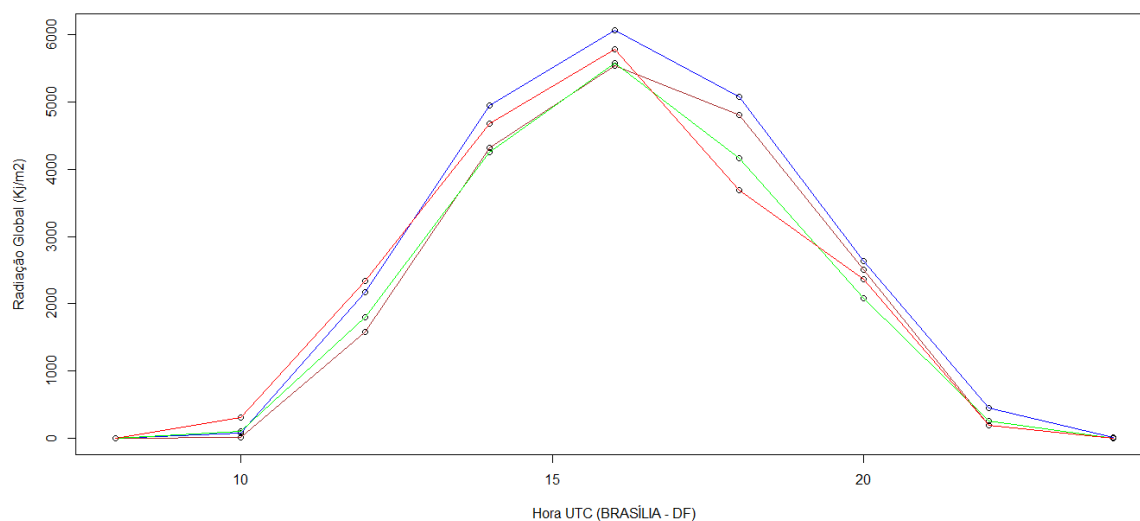
Estação A001 da cidade de Brasília – DF: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.12 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A001 na cidade de Brasília – DF, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	48,23	1,36	110,65	406,34
12:00	1052,62	839,40	1634,10	2255,18
14:00	2765,73	2836,06	3616,35	4188,70
16:00	3987,55	3964,86	4474,53	4732,94
18:00	2564,65	3279,92	4689,67	3742,22
20:00	1267,00	1231,94	1939,45	1813,06
22:00	143,57	25,28	90,23	330,72
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.12 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A001 na cidade de Brasília – DF, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

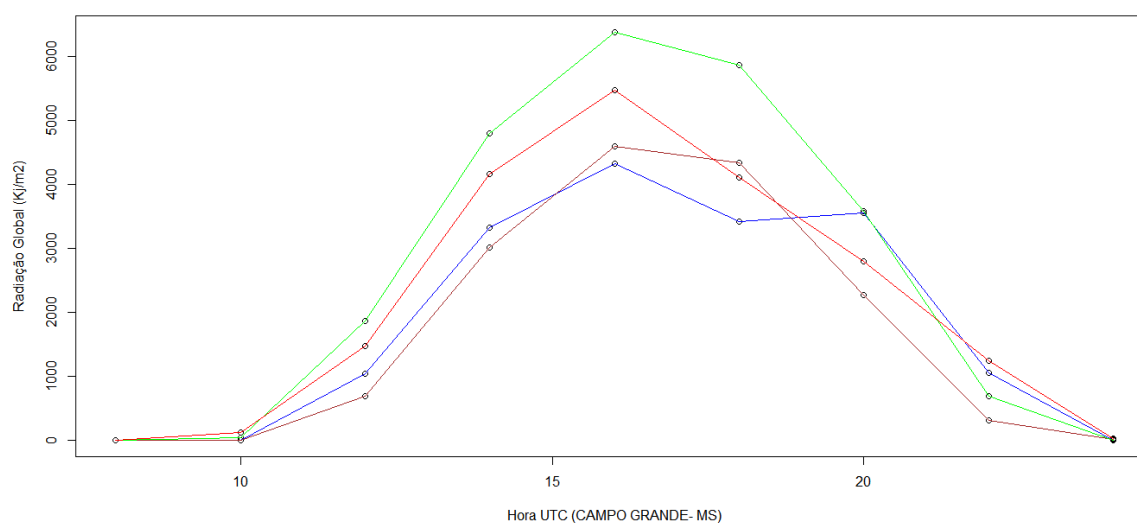
Estação A702 da cidade de Campo Grande – MS: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.13 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A702 na cidade de Campo Grande – MS, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	0,73	0,00	32,48	115,20
12:00	1038,70	682,13	1868,80	1474,53
14:00	3319,77	3014,30	4792,40	4158,17
16:00	4325,53	4589,17	6380,45	5480,68
18:00	3415,97	4338,43	5866,90	4110,62
20:00	3557,30	2273,00	3586,25	2799,55
22:00	1050,33	303,47	680,82	1239,48
24:00	0,00	7,00	0,00	28,10

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.13 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A702 na cidade de Campo Grande – MS, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

## Bioma Caatinga

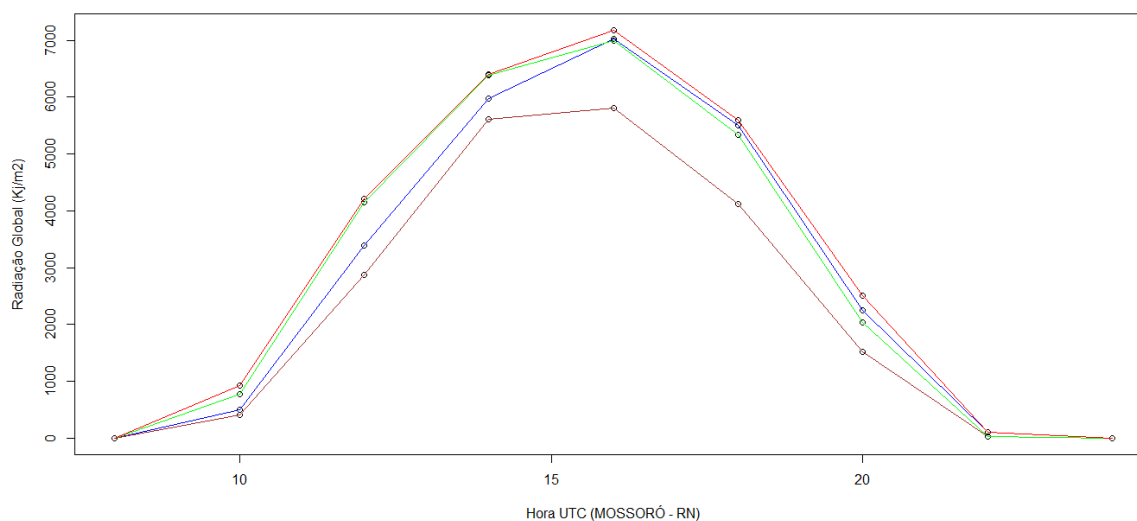
Estação A318 da cidade de Mossoró – RN: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.14 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A318 na cidade de Mossoró – RN, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	498,10	407,75	767,57	922,70
12:00	3383,90	2878,90	4152,36	4206,30
14:00	5971,97	5605,00	6381,77	6399,00
16:00	7031,06	5803,85	6992,47	7176,70
18:00	5504,10	4125,90	5329,30	5595,50
20:00	2241,34	1516,95	2040,00	2507,95
22:00	94,90	26,45	31,46	98,85
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.14 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A318 na cidade de Mossoró – RN, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

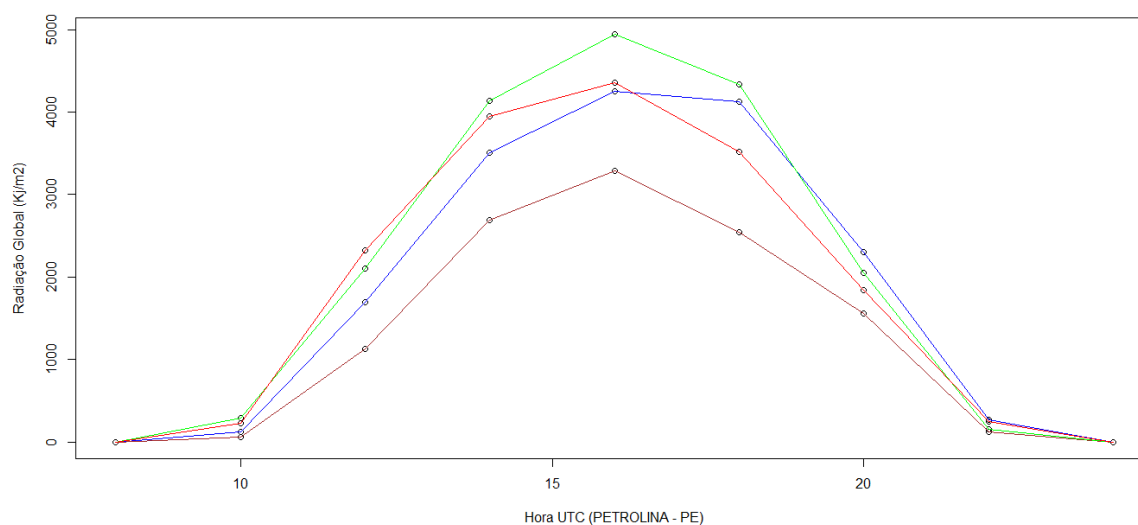
Estação A307 da cidade de Petrolina – PE: Dados referentes à média horária, da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.15 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A307 na cidade de Petrolina – PE, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	126,93	62,00	286,08	231,28
12:00	1699,15	1125,98	2100,25	2322,52
14:00	3508,30	2685,97	4134,12	3949,45
16:00	4253,85	3291,65	4942,80	4358,78
18:00	4129,72	2544,13	4337,18	3516,67
20:00	2304,13	1559,40	2055,75	1843,18
22:00	273,37	118,90	149,82	244,47
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.15 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A307 na cidade de Petrolina – PE, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

## Bioma Pampa

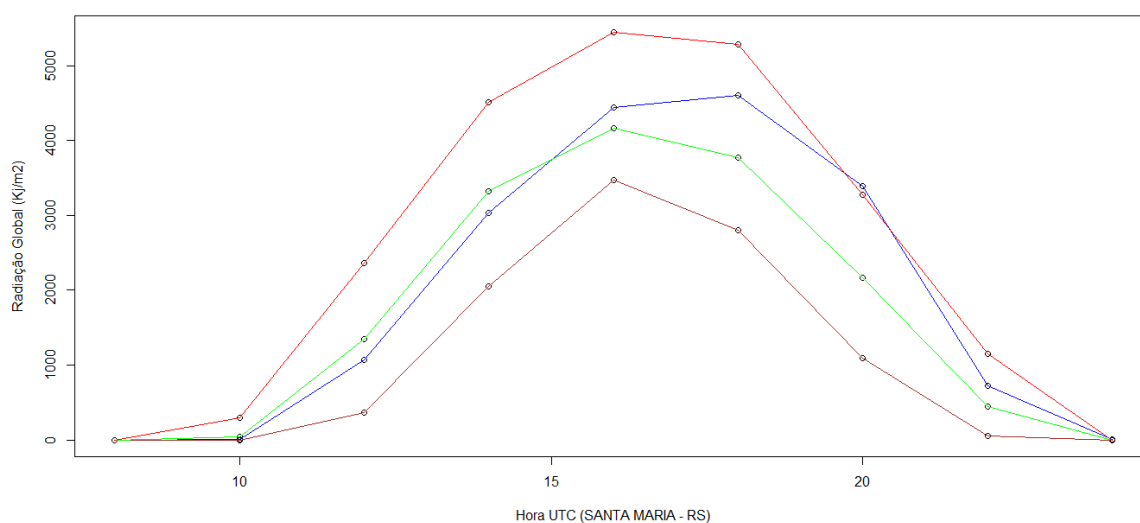
Estação A803 da cidade de Santa Maria – RS: dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.16 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A803 na cidade de Santa Maria – RS, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	8,46	0,00	47,38	302,16
12:00	1068,84	366,75	1342,92	2359,94
14:00	3034,88	2047,90	3326,12	4514,18
16:00	4439,60	3474,90	4158,88	5443,72
18:00	4600,88	2803,90	3765,62	5279,94
20:00	3388,92	1091,30	2170,28	3272,62
22:00	725,80	55,18	449,60	1152,04
24:00	3,94	0,00	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2023).

Figura A.16 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A803 na cidade de Santa Maria – RS, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

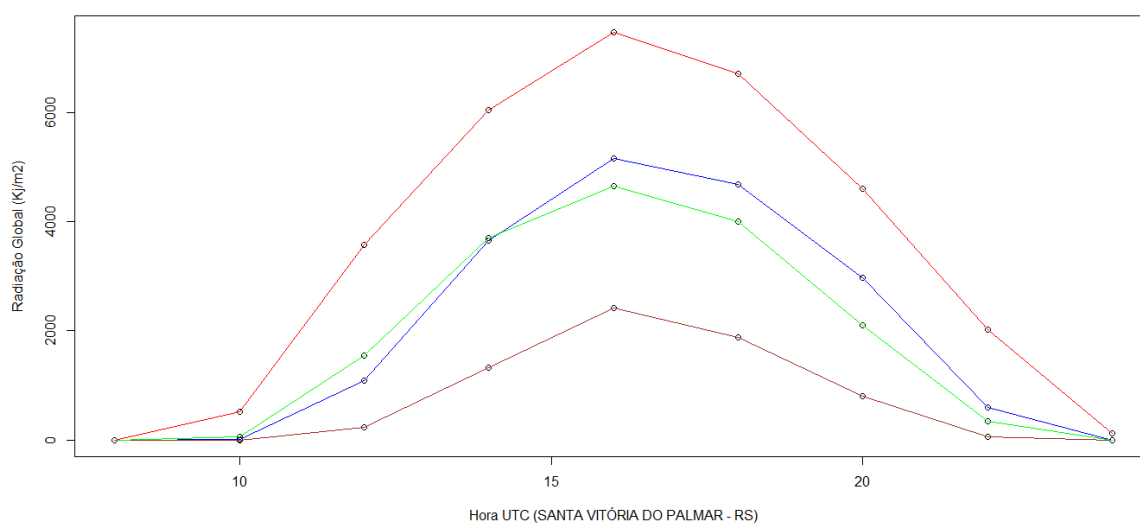
Estação A899 da cidade de Santa Vitória do Palmar – RS: Dados referentes à média horária da irradiação global medida no nível do solo nos equinócios e solstícios, de 2018 a 2022.

Tabela A.17 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A899 na cidade de Santa Vitória do Palmar – RS, de 2018 a 2022.

Hora UTC	Radiação global ( $\text{kJ/m}^2$ )			
	Equinócio de Outono	Solstício de Inverno	Equinócio de Primavera	Solstício de Verão
08:00	0,00	0,00	0,00	0,00
10:00	10,80	0,70	53,85	515,33
12:00	1094,93	239,97	1549,08	3575,87
14:00	3651,57	1328,10	3704,92	6033,80
16:00	5149,27	2413,93	4653,98	7463,80
18:00	4675,56	1885,00	3999,47	6708,27
20:00	2968,94	795,10	2106,50	4608,16
22:00	593,80	53,10	343,18	2018,04
24:00	0,00	0,00	0,00	117,40

Fonte: Do autor (2023).

Tabela A.17 – Média horária da irradiação global, em  $\text{kJ/m}^2$ , da Estação Meteorológica A899 na cidade de Santa Vitória do Palmar – RS, de 2018 a 2022.



Legenda: Equinócio de Outono em azul, Solstício de Inverno em marrom, Equinócio de Primavera em verde e Solstício de Verão em vermelho.

Fonte: Do autor (2023).

## APÊNDICE B – Ajuste dos modelos aos dados e seleção dos modelos

### Bioma Mata Atlântica

#### B.1 Ajuste aos dados da cidade de Recife – PE

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Recife - PE estão apresentados na Tabela B.1. O modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos nos dados do Solstício de Inverno e do Equinócio de Primavera. Em contrapartida, os modelos Gompertz e Logístico atenderam a todos os pressupostos.

Tabela B.1 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Recife - PE. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,3002	0,2820	0,2352	0,0893	0,3281	0,1500
Gompertz	0,3170	0,2177	0,2927	0,9732	0,1051	0,2034
Von Bertalanffy	0,6538	0,1179	0,1649	0,9956	0,1364	0,0357

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,4900	0,5257	0,1964	0,3673	0,1633	0,0861
Gompertz	0,9312	0,2455	0,2129	0,5571	0,0569	0,2189
Von Bertalanffy	0,9542	0,3143	0,0017	0,9295	0,0881	0,1051

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico apresentou o melhor ajuste aos dados do Equinócio de Outono, enquanto o modelo Gompertz foi mais adequado para os Solstícios e o Equinócio de Primavera, conforme mostrado na Tabela B.2. A ausência de valores de DPR, R<sup>2</sup> e AIC para o modelo von Bertalanffy no Solstício de Inverno e no Equinócio de Primavera se justifica pela inadequação do modelo aos critérios de ajuste.

Tabela B.2 – Seleção dos modelos para a cidade de Recife – PE: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	856,5	0,99450	134,99	522,8	0,99708	127,09
Gompertz	876,7	0,99458	135,36	486,6	0,99768	125,94
Von Bertalanffy	982,9	0,99332	137,19	-----	-----	-----

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	440,7	0,99799	124,36	718,0	0,99632	132,17
Gompertz	416,1	0,99833	123,44	558,9	0,99792	128,16
Von Bertalanffy	-----	-----	-----	691,2	0,99690	131,56

Fonte: Do autor (2023).

## B.2 Ajuste aos dados da cidade de Belo Horizonte – MG

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Belo Horizonte - MG estão apresentados na Tabela B.3. O modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos nos Equinócios e no Solstício de Inverno, assim como ao pressuposto de homogeneidade das variâncias nos dados do Solstício de Verão. Em contrapartida, os modelos Gompertz e Logístico atenderam a todos os pressupostos.

Tabela B.3 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Belo Horizonte - MG. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,5479	0,5722	0,2850	0,6544	0,5987	0,1858
Gompertz	0,4487	0,1149	0,3364	0,6670	0,3637	0,2593
Von Bertalanffy	0,7459	0,0849	0,0222	0,8460	0,4297	0,0024

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,8442	0,4139	0,3107	0,9343	0,2862	0,1040
Gompertz	0,6939	0,1929	0,2944	0,7981	0,2348	0,4569
Von Bertalanffy	0,6953	0,5677	0,0010	0,8072	0,0453	0,2303

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico apresentou o melhor ajuste aos dados dos Equinócios e do Solstício de Inverno, enquanto o modelo Gompertz foi mais adequado para os dados do Solstício de Verão, conforme mostrado na Tabela B.4.

Tabela B.4 – Seleção dos modelos para a cidade de Belo Horizonte – MG: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	396,1	0,99797	122,65	328,2	0,99875	119,64
Gompertz	453,3	0,99750	124,81	419,1	0,99809	123,55

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	303,4	0,99858	118,38	680,0	0,99522	131,30
Gompertz	352,1	0,99820	120,76	429,0	0,99823	123,93

Fonte: Do autor (2023).

Nos resultados do diagnóstico de ajuste dos modelos aos dados, o modelo Gompertz apresentou os melhores resultados no Solstício de Verão. No entanto, optou-se pelo modelo Logístico, pois os valores do DPR,  $R^2$  e AIC são próximos, permitindo uma melhor comparação dos parâmetros.

### B.3 Ajuste aos dados da cidade de Vitória – ES

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Vitória - ES estão apresentados na Tabela B.5. O modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos nos quatro conjuntos de dados analisados. Já os modelos Gompertz e Logístico atenderam a todos os pressupostos.

Tabela B.5 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Vitória - ES. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,1352	0,6541	0,2289	0,8028	0,1686	0,3319
Gompertz	0,9002	0,6654	0,2220	0,8669	0,2440	0,1677
Von Bertalanffy	0,7644	0,5427	0,0009	0,5696	0,7650	0,0005

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,9776	0,2463	0,3507	0,0943	0,4196	0,1131
Gompertz	0,9816	0,2788	0,2306	0,7224	0,3363	0,1467
Von Bertalanffy	0,6510	0,9613	0,0002	0,7740	0,2866	0,0152

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico se ajustou melhor aos dados dos equinócios e do Solstício de Verão, enquanto o modelo Gompertz apresentou melhor ajuste aos dados do Solstício de Inverno, conforme mostrado na Tabela B.6.

Tabela B.6 – Seleção dos modelos para a cidade de Vitória – ES. Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	368,5	0,99892	121,49	305,3	0,99881	118,48
Gompertz	530,8	0,99791	127,33	325,4	0,99874	119,51

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	204,2	0,99833	112,05	422,4	0,99861	123,68
Gompertz	150,7	0,99915	107,18	588,0	0,99749	128,97

Fonte: Do autor (2023).

Nos resultados do diagnóstico de ajuste dos modelos aos dados, o modelo Gompertz apresentou os melhores resultados no Solstício de Inverno. Contudo, optou-se pelo modelo Logístico, pois os valores de DPR,  $R^2$  e AIC são próximos, o que facilita a comparação dos parâmetros.

#### B.4 Ajuste aos dados da cidade do Rio de Janeiro

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade do Rio de Janeiro - RJ estão apresentados na Tabela B.7. O modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos nos quatro conjuntos de dados analisados. Em contrapartida, os modelos Gompertz e Logístico atenderam a todos os pressupostos.

Tabela B.7 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade do Rio de Janeiro - RJ. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,5871	0,4574	0,1856	0,8331	0,6771	0,2504
Gompertz	0,8793	0,0726	0,3559	0,5689	0,1616	0,2606
Von Bertalanffy	0,5499	0,1336	0,0056	0,8872	0,3065	0,0046

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,7246	0,5223	0,4330	0,9299	0,1879	0,1012
Gompertz	0,8541	0,6040	0,3271	0,1123	0,6186	0,2570
Von Bertalanffy	0,6811	0,6462	0,0016	0,1907	0,3311	0,0130

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico se ajustou melhor aos dados dos solstícios e do Equinócio de Primavera, enquanto o modelo Gompertz apresentou melhor ajuste aos dados do Equinócio de Outono, conforme mostrado na Tabela B.8.

Tabela B.8 – Seleção dos modelos para a cidade do Rio de Janeiro – RJ. Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	427,4	0,99738	123,87	292,3	0,99852	117,79
Gompertz	283,7	0,99892	117,31	370,4	0,99777	121,58

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	240,8	0,99873	114,68	379,2	0,99845	121,95
Gompertz	365,0	0,99724	121,34	383,4	0,99852	122,13

Fonte: Do autor (2023).

Nos resultados do diagnóstico de ajuste dos modelos aos dados, o modelo Gompertz apresentou os melhores resultados no Equinócio de Outono. Contudo, optou-se pelo modelo Logístico, uma vez que os valores de DPR,  $R^2$  e AIC foram semelhantes e este modelo possibilita uma melhor comparação dos parâmetros.

### B.5 Ajuste aos dados da cidade de São Paulo - SP

O resultado dos ajustes aos dados da cidade de São Paulo - SP, apresentado na Tabela B.9, indicou que o modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos

resíduos em nenhum dos quatro conjuntos de dados. Por outro lado, os modelos Gompertz e Logístico atenderam a todos os pressupostos.

Tabela B.9 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de São Paulo - SP. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,6836	0,8571	0,1692	0,6462	0,5531	0,4074
Gompertz	0,6097	0,0676	0,4388	0,3542	0,1688	0,3168
Von Bertalanffy	0,1555	0,7819	0,0026	0,9241	0,2540	0,0152

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,5931	0,1669	0,3769	0,9997	0,4000	0,0848
Gompertz	0,4976	0,2784	0,3275	0,5078	0,1283	0,1872
Von Bertalanffy	0,4874	0,6881	0,0016	0,7226	0,2930	0,0035

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico apresentou o melhor ajuste aos dados, com os melhores valores de DPR,  $R^2$  e AIC, conforme mostrado na Tabela B.10.

Tabela B.10 – Seleção dos modelos para a cidade de São Paulo – SP. Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	164,9	0,99925	108,63	352,2	0,99823	120,77
Gompertz	206,7	0,99889	112,24	495,6	0,99669	126,24

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	196,7	0,99903	111,45	299,2	0,99877	118,16
Gompertz	279,2	0,99816	117,05	302,4	0,99883	118,33

Fonte: Do autor (2023).

## B.6 Ajuste aos dados da cidade de Curitiba - PR

O resultado dos ajustes aos dados da cidade de Curitiba - PR, apresentado na Tabela B.11, indicou que o modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos nos Equinócios e no Solstício de Inverno. O modelo Logístico, por sua vez, não atendeu a esta condição no Equinócio de Primavera. O modelo Gompertz atendeu a todos os pressupostos.

Tabela B.11 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Curitiba - PR. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0.6718	0.3088	0.3703	0,0916	0,4373	0,1518
Gompertz	0.7759	0.6833	0.2774	0,9298	0,4644	0,1315
Von Bertalanffy	0.3318	0.4007	0.0279	0,6664	0,4361	0,0018

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0.6323	0,6886	0,3801	0,7888	0,4864	0,0101
Gompertz	0,7505	0,6905	0,2334	0,6397	0,3885	0,1312
Von Bertalanffy	0,5147	0,8287	0,0001	0,5054	0,4832	0,0983

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Gompertz apresentou o melhor ajuste aos dados, com os melhores valores de DPR,  $R^2$  e AIC. A ausência de valores de DPR,  $R^2$  e AIC no Equinócio de Primavera para o modelo Logístico, assim como no Solstício de Inverno para o modelo von Bertalanffy, se justifica pelo fato de que esses modelos não atenderam aos pressupostos de ajuste, conforme apresentado na Tabela B.12.

Tabela B.12 – Seleção dos modelos para a cidade de Curitiba – PR. Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	373,4	0,99685	121,70	295,3	0,99856	117,95
Gompertz	453,7	0,99563	124,82	329,6	0,99834	119,71

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	169,2	0,99880	109,04	-----	-----	-----
Gompertz	207,0	0,99831	112,26	370,5	0,99868	121,58
Von Bertalanffy	-----	-----	-----	582,7	0,99680	128,83

Fonte: Do autor (2023).

Nos resultados do diagnóstico de ajuste, o modelo Logístico apresentou os melhores resultados para o Solstício de Inverno, Equinócio de Primavera e Equinócio de Outono. Contudo, optou-se pelo modelo Gompertz, pois os valores de DPR,  $R^2$  e AIC são próximos aos do modelo Logístico, e o modelo Gompertz atendeu ao diagnóstico de ajuste nos quatro fenômenos, o que possibilita uma melhor comparação dos parâmetros.

## Bioma Amazônia

### B.7 Ajuste aos dados da cidade de Macapá - AP

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Macapá - AP, apresentados na Tabela B.13, mostram que, nos quatro eventos analisados, o modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos. Já os modelos Gompertz e Logístico atenderam a todos os pressupostos.

Tabela B.13 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Macapá - AP. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,9572	0,6093	0,1740	0,3014	0,8831	0,2081
Gompertz	0,8341	0,5158	0,1385	0,8459	0,6340	0,1272
Von Bertalanffy	0,2075	0,8937	0,0000	0,5298	0,5712	0,0000

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,9482	0,1993	0,1464	0,1657	0,4970	0,1963
Gompertz	0,4916	0,8007	0,1537	0,7963	0,6045	0,1232
Von Bertalanffy	0,3757	0,8712	0,0000	0,2973	0,7490	0,0000

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico apresentou o melhor ajuste aos dados em todos os eventos analisados, conforme mostrado na Tabela B.14.

Tabela B.14 – Seleção dos modelos para a cidade de Macapá – AP: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	276,2	0,998823	131,07	476,3	0,9986	140,88
Gompertz	305,3	0,998654	132,87	675,9	0,9973	147,18
Von Bertalanffy						

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	248,5	0,99931	129,17	338,4	0,99885	134,73
Gompertz	365,1	0,99861	136,10	455,2	0,99806	140,07

Fonte: Do autor (2023).

## B.8 Ajuste aos dados da cidade de Manaus – AM

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Manaus - AM, apresentados na Tabela B.15, mostram que o modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos nos Equinócios e no Solstício de Inverno, enquanto o modelo Logístico não atendeu a essa condição no Equinócio de Primavera. O modelo Gompertz, por sua vez, atendeu a todos os pressupostos.

Tabela B.15 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Manaus - AM. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,0718	0,5149	0,1407	0,9880	0,1247	0,0885
Gompertz	0,8512	0,2225	0,2722	0,7177	0,5281	0,0962
Von Bertalanffy	0,3471	0,6970	0,0135	0,5536	0,5543	0,0173

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,2024	0,5031	0,2513	0,1481	0,8213	0,0283
Gompertz	0,9403	0,5193	0,1509	0,8714	0,0601	0,9423
Von Bertalanffy	0,7464	0,4862	0,0028	0,8763	0,1223	0,8870

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Gompertz apresentou o melhor ajuste aos dados, com os melhores valores de DPR,  $R^2$  e AIC. A ausência de valores de DPR,  $R^2$  e AIC no Equinócio de Primavera para o modelo Logístico se justifica pelo fato de ele não ter atendido aos pressupostos de ajuste, assim como o modelo von Bertalanffy no Solstício de Inverno, conforme mostrado na Tabela B.16.

Tabela B.16 – Seleção dos modelos para a cidade de Manaus – AM: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	374,5	0,9972	121,75	367,3	0,998298	121,44
Gompertz	175,0	0,9994	109,58	358,6	0,998502	121,06

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	301,4	0,9985	118,28	-----	-----	-----
Gompertz	390,2	0,9977	122,41	94,98	0,999277	99,80
Von Bertalanffy	-----	-----	-----	129,90	0,998675	104,81

Fonte: Do autor (2023).

Nos resultados do diagnóstico de ajuste, o modelo Gompertz apresentou o melhor desempenho em 3 dos 4 casos, enquanto o modelo Logístico apresentou os melhores resultados no Solstício de Inverno. Optou-se pelo modelo Gompertz, pois utilizar um único modelo permite uma melhor comparação dos parâmetros.

### B.9 Ajuste aos dados da cidade de Humaitá - AM

Os resultados dos ajustes aos dados de irradiação global da cidade de Humaitá - AM, apresentados na Tabela B.17, mostram que o modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos em nenhum dos quatro conjuntos de dados analisados. O modelo Logístico não atendeu aos pressupostos de homogeneidade das variâncias no Equinócio de Primavera e de normalidade dos resíduos no Solstício de Verão. Por outro lado, o modelo Gompertz atendeu a todos os pressupostos.

Tabela B.17 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Humaitá - AM. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,7339	0,1830	0,3155	0,3407	0,0401	0,3339
Gompertz	0,5861	0,0613	0,6501	0,3776	0,5136	0,2951
Von Bertalanffy	0,1618	0,8615	0,0020	0,5304	0,4914	0,0008

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,8625	0,1967	0,1828	0,0194	0,4772	0,4497
Gompertz	0,9061	0,2841	0,1851	0,8711	0,5852	0,2689
Von Bertalanffy	0,4738	0,6268	0,0000	0,8707	0,4102	0,0112

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Gompertz apresentou o melhor ajuste aos dados, com os melhores valores de DPR,  $R^2$  e AIC. A ausência de valores de DPR,  $R^2$  e AIC no Equinócio de Primavera e no Solstício de Verão para o modelo Logístico se justifica pelo fato de ele não ter atendido aos pressupostos de ajuste, conforme mostrado na Tabela B.18.

Tabela B.18 – Seleção dos modelos para a cidade de Humaitá – AM: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	396,9	0,9964	137,60	-----	-----	-----
Gompertz	228,6	0,9989	127,66	338,8	0,9977	134,75

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	319,7	0,99814	133,70	-----	-----	-----
Gompertz	265,9	0,99879	130,39	536,1	0,9944	143,01

Fonte: Do autor (2023).

### B.10 Ajuste aos dados da cidade de Rio Branco – AC

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Rio Branco – AC, apresentados na Tabela B.19, indicam que, nos quatro eventos analisados, o modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos. O modelo Gompertz não atendeu aos pressupostos de normalidade e independência dos resíduos no Equinócio de Outono, enquanto o modelo Logístico atendeu a todos os pressupostos.

Tabela B.19 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Rio Branco – AC. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,5679	0,7097	0,1465	0,9257	0,3186	0,1976
Gompertz	0,0416	0,3081	0,4004	0,3442	0,0530	0,3573
Von Bertalanffy	0,7209	0,7691	0,0004	0,8780	0,1050	0,0190

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,8306	0,8268	0,1513	0,7217	0,3260	0,1392
Gompertz	0,1561	0,2447	0,2709	0,0815	0,2694	0,1900
Von Bertalanffy	0,4503	0,8971	0,0004	0,2903	0,3675	0,0070

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico apresentou o melhor ajuste aos dados do Equinócio de Outono e do Solstício de Verão, enquanto o modelo Gompertz se ajustou melhor aos dados do Solstício de Inverno e do Equinócio de Primavera, conforme mostrado na Tabela B.20.

Tabela B.20 – Seleção dos modelos para a cidade de Rio Branco – AC: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	174,8	0,99944	122,84	439,1	0,99677	124,30
Gompertz	-----	-----	-----	289,8	0,99870	117,65

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	265,8	0,99910	130,38	218,1	0,99931	113,10
Gompertz	254,5	0,99922	129,60	406,2	0,99776	123,05

Fonte: Do autor (2023).

Embora o modelo Gompertz tenha apresentado os melhores resultados no diagnóstico de ajuste aos dados do Solstício de Inverno e do Equinócio de Primavera, optou-se pelo modelo Logístico, pois os valores de DPR,  $R^2$  e AIC são próximos, o que possibilita uma melhor comparação dos parâmetros ajustados.

### **Bioma Cerrado**

Ajuste aos dados da cidade de São Luís – MA está descrito no item 4.1

#### **B.11 Ajuste aos dados da cidade de Brasília – DF**

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Brasília estão apresentados na Tabela B.21. Em todos os quatro eventos, o modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos. Em contrapartida, os modelos Logístico e Gompertz atenderam a todos os pressupostos.

Tabela B.21 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Brasília. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,4690	0,4512	0,1424	0,5748	0,6033	0,1417
Gompertz	0,8062	0,6083	0,1204	0,4902	0,1068	0,2898
Von Bertalanffy	0,3565	0,7634	0,0000	0,4248	0,5487	0,0019

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,2020	0,3833	0,2481	0,4895	0,8401	0,1360
Gompertz	0,7446	0,0940	0,3464	0,7840	0,4988	0,1625
Von Bertalanffy	0,4835	0,3191	0,0039	0,2955	0,8265	0,0003

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico apresentou os melhores resultados nos critérios de seleção, obtendo, nos quatro casos, o maior coeficiente de determinação, menores valores do desvio padrão residual e melhores resultados pelo Critério de Informação de Akaike, conforme mostrado na Tabela B.22.

Tabela B.22 – Seleção dos modelos de para a cidade Brasília-DF: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	368,9	0,9988	136,28	288,4	0,9990	117,57
Gompertz	448,3	0,9983	139,79	325,4	0,9988	119,50

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	368,8	0,9985	121,51	332,4	0,9988	134,40
Gompertz	383,9	0,9985	122,15	351,0	0,9987	135,39

Fonte: Do autor (2023).

## B.12 Ajuste aos dados da cidade de Campo Grande – MS

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Campo Grande - MS estão apresentados na Tabela B.23. Nos quatro eventos, o modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos. O modelo Gompertz não atendeu ao pressuposto de homogeneidade de variâncias dos resíduos para os dados do Solstício de Verão. O modelo Logístico, por sua vez, atendeu a todos os pressupostos.

Tabela B.23 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Campo Grande - MS. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,1767	0,2297	0,2668	0,6208	0,5459	0,1766
Gompertz	0,5940	0,0932	0,3510	0,4950	0,5659	0,1286
Von Bertalanffy	0,9391	0,3583	0,0065	0,5975	0,6246	0,0000

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,7061	0,1370	0,2263	0,2840	0,4566	0,0873
Gompertz	0,3733	0,2122	0,3437	0,5887	0,0379	0,1704
Von Bertalanffy	0,3160	0,0736	0,0305	0,1483	0,6960	0,0001

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Gompertz ajustou-se melhor aos dados do Equinócio de Outono, enquanto o modelo Logístico apresentou o melhor ajuste para os dados do Equinócio de Primavera e dos Solstícios, conforme mostrado na Tabela B.24.

Tabela B.24 – Seleção dos modelos para a cidade de Campo Grande – MS: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	479,3	0,9965	140,99	413,6	0,99870	138,34
Gompertz	393,3	0,9978	137,44	532,8	0,99798	142,90

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	278,3	0,99873	102,75	DPR	$R^2$	AIC
Gompertz	326,4	0,99838	104,98	407,4	0,9981	138,07
				-----	-----	-----

Fonte: Do autor (2023).

Embora o modelo Gompertz tenha apresentado os melhores resultados no diagnóstico de ajuste para os dados do Equinócio de Outono, optou-se pelo uso do modelo Logístico. Isso porque os valores de DPR,  $R^2$  e AIC são próximos entre os dois modelos, permitindo uma melhor comparação dos parâmetros ajustados.

## Bioma Caatinga

### B.13 Ajuste aos dados da cidade de Mossoró – RN

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Mossoró - RN estão apresentados na Tabela B.25. O modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos nos quatro conjuntos de dados, enquanto os modelos Gompertz e Logístico atenderam a todos os pressupostos.

Tabela B.25 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Mossoró - RN. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,3840	0,5854	0,1761	0,2608	0,404	0,1603
Gompertz	0,7130	0,2966	0,2051	0,8605	0,322	0,1845
Von Bertalanffy	0,8451	0,3320	0,0038	0,8442	0,2767	0,0054

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,9561	0,5439	0,1879	0,3268	0,3244	0,1220
Gompertz	0,8896	0,2502	0,1779	0,7088	0,1864	0,1791
Von Bertalanffy	0,6879	0,4820	0,0004	0,7499	0,1951	0,0111

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico foi o que melhor se ajustou aos dados, apresentando os melhores valores de Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critério de Informação de Akaike (AIC), conforme demonstrado na Tabela B.26.

Tabela B.26 – Seleção dos modelos para a cidade de Mossoró – RN: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	440,1	0,99872	124,33	515,9	0,99834	126,88
Gompertz	581,8	0,99791	128,80	600,4	0,99790	129,31

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	369,5	0,99869	121,54	525,5	0,99840	127,17
Gompertz	397,5	0,99858	122,71	612,7	0,99797	129,63

Fonte: Do autor (2023).

### B.14 Ajuste aos dados da cidade de Petrolina - PE

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Petrolina - PE estão apresentados na Tabela B.27. O modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos, enquanto os modelos Gompertz e Logístico atenderam a todos os pressupostos.

Tabela B.27 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Petrolina - PE. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,4979	0,5538	0,2090	0,7984	0,6326	0,2007
Gompertz	0,6269	0,1143	0,3158	0,4624	0,0978	0,2304
Von Bertalanffy	0,7546	0,0934	0,0188	0,9047	0,2081	0,0074

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,4962	0,7574	0,2053	0,9545	0,4867	0,1183
Gompertz	0,9920	0,0860	0,3886	0,6469	0,0832	0,2871
Von Bertalanffy	0,2609	0,1862	0,0059	0,7910	0,1516	0,0073

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico apresentou o melhor ajuste aos dados dos Equinócios, enquanto o modelo Gompertz se ajustou melhor aos dados dos Solstícios, conforme mostrado na Tabela B.28.

Tabela B.28 – Seleção dos modelos para a cidade de Petrolina – PE: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	332,4	0,99829	119,85	329,6	0,99864	119,71
Gompertz	371,6	0,99799	121,63	419,0	0,99795	123,55

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	236,8	0,99825	114,42	360,7	0,99798	121,15
Gompertz	198,7	0,99885	111,61	288,6	0,99879	117,58

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados do diagnóstico de ajuste indicaram que o modelo Gompertz apresentou os melhores resultados para os Solstícios. No entanto, optou-se pelo uso do modelo Logístico,

pois os valores de DPR,  $R^2$  e AIC são próximos, o que facilita a comparação dos parâmetros entre os diferentes conjuntos de dados.

## Bioma Pampa

### B.15 Ajuste aos dados da cidade de Santa Maria - RS

O resultado dos ajustes aos dados da cidade de Santa Maria - RS, Tabela B.29, o modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto independência do resíduo nos quatro conjuntos de dados, os modelos Gompertz e Logístico atenderam a todos os pressupostos.

Tabela B.29 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Santa Maria - RS. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,4230	0,9212	0,2527	0,8148	0,3412	0,1411
Gompertz	0,6513	0,5177	0,1542	0,6771	0,1231	0,3518
Von Bertalanffy	0,8810	0,5196	0,0005	0,4737	0,2256	0,0061

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,5817	0,1363	0,3096	0,9397	0,3582	0,0747
Gompertz	0,1406	0,2620	0,3168	0,6823	0,4740	0,0928
Von Bertalanffy	0,4690	0,7097	0,0062	0,9003	0,3197	0,0005

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico melhor se ajustou aos dados dos Solstícios e do Equinócio de Outono, o modelo Gompertz melhor se ajustou aos dados do Equinócio de Primavera, Tabela B.30.

Tabela B.30 – Seleção dos modelos para a cidade de Santa Maria - RS, o Desvio Padrão Residual (DPR), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), Critérios de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	319,3	0,99861	133,68	294,8	0,99846	117,92
Gompertz	463,2	0,99726	140,38	252,7	0,99894	115,46

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	149,2	0,99918	94,02	398,9	0,99861	137,69
Gompertz	209,0	0,99850	98,74	477,2	0,99815	140,91

Fonte: Do autor (2023).

Nos resultados do diagnóstico de ajuste dos modelos dos dados, o modelo Gompertz apresentou os melhores resultados no Equinócio de Primavera, contudo optou-se pelo modelo Logístico porque resultados dos valores do DPR,  $R^2$  e AIC são próximos e possibilita melhor comparação dos parâmetros.

### B.16 Ajuste aos dados da cidade de Santa Vitória do Palmar - RS

Os resultados dos ajustes aos dados da cidade de Santa Vitória do Palmar - RS, apresentados na Tabela B.31, mostram que o modelo von Bertalanffy não atendeu ao pressuposto de independência dos resíduos nos quatro fenômenos analisados. O modelo Logístico não atendeu a essa condição no Solstício de Verão, enquanto o modelo Gompertz atendeu a todos os pressupostos.

Tabela B.31 – Ajuste dos modelos aos dados da cidade de Santa Vitória do Palmar - RS. Resultados dos testes Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,6662	0,4045	0,1983	0,4286	0,4065	0,1521
Gompertz	0,8007	0,1435	0,4342	0,6167	0,1073	0,3168
Von Bertalanffy	0,2557	0,2968	0,0073	0,5925	0,3341	0,0035

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	SW	BP	DW	SW	BP	DW
Logístico	0,6512	0,4287	0,2777	0,8822	0,4749	0,0386
Gompertz	0,4109	0,2743	0,3027	0,9249	0,2299	0,1004
Von Bertalanffy	0,4133	0,8148	0,0083	0,8177	0,2525	0,0017

Fonte: Do autor (2023).

O modelo Logístico apresentou o melhor ajuste aos dados do Solstício de Inverno, enquanto o modelo Gompertz melhor se ajustou aos dados dos Equinócios e do Solstício de Verão. A ausência de valores do DPR,  $R^2$  e AIC no Solstício de Verão justifica-se pelo fato de que o modelo Logístico não atendeu aos pressupostos de ajuste, conforme mostrado na Tabela B.32.

Tabela B.32 – Seleção dos modelos para a cidade de Santa Vitória do Palmar – RS: Desvio Padrão Residual (DPR), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), Critério de Informação de Akaike (AIC).

Modelo	Equinócio de Outono – Março			Equinócio de Primavera – Setembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	342,0	0,998557	120,30	303,9	0,99861	118,41
Gompertz	288,1	0,99904	117,55	290,5	0,99881	117,69

Modelo	Solstício de Inverno – Junho			Solstício de Verão – Dezembro		
	DPR	$R^2$	AIC	DPR	$R^2$	AIC
Logístico	95,9	0,99927	87,83	-----	-----	-----
Gompertz	129,5	0,99877	92,04	558,7	0,9986	143,75

Fonte: Do autor (2023).

Nos resultados do diagnóstico de ajuste, o modelo Logístico apresentou o melhor ajuste no Solstício de Inverno. Contudo, optou-se pelo modelo Gompertz, pois os valores do DPR,  $R^2$  e AIC são próximos, permitindo uma melhor comparação dos parâmetros.

## APÊNDICE C – Script

```

## RADIAÇÃO GLOBAL NO SOLO - BRASÍLIA - DF
## EQUINÓCIO DE MARÇO MÉDIA ACUMULADA DE 2018-2022
## X1: Tempo em UTC
X1 <- c(8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24)
## Y1: Radiação Global no Equinócio de Março de 2018-2022
Y1 <- c(0, 77.16, 2251.1, 7202.52, 13388.74, 18464.46, 21096.3,
        21546.82, 21547.4 )
plot(X1,Y1)
## modEM1: Modelo Logístico
modEM1 <- nls(Y1 ~ a/(1+exp(k*(b-X1))), start = c(a=1900, k=0.6, b=15))
summary(modEM1)
shapiro.test(residuals(modEM1)) ## Normalidade dos resíduos
library(lmtest)
MGEM1=attr(modEM1$m$fitted(),"gradient")
mlgEM1=lm(Y1~ -1 +MGEM1)
bptest(mlgEM1) ## Homocedasticidade dos resíduos
dwtest(mlgEM1) ## Independência dos resíduos
library(nlme)
library(qpcR)
Rsqa.ad(modEM1)
Rsqa(modEM1)
AIC(modEM1)
## Modelo logístico AutoRegressivo
modEM1a <- gnls(Y1 ~ a/(1+exp(k*(b-X1))), start = c(a=18000, k=0.55, b=13),
               correlation = corAR1())
summary(modEM1a)
shapiro.test(residuals(modEM1a)) ## Normalidade dos resíduos
#####
## modEM2: Modelo Gompertz
modEM2 <- nls(Y1 ~ a*exp(-exp(k*(b-X1))), start = c(a=19000, k=0.4, b=15))
summary(modEM2)
shapiro.test(residuals(modEM2)) ## Normalidade dos resíduos

```

```

MGEM2=attr(modEM2$m$fitted(),"gradient")
mlgEM2=lm(Y1~ -1 +MGEM2)
bptest(mlgEM2) ## Homocedasticidade dos resíduos
dwtest(mlgEM2) ## Independência dos resíduos
library(qpcR)
Rsq.ad(modEM2)
Rsq(modEM2)
AIC(modEM2)
## Modelo logístico AutoRegressivo
modEM1a <- gnls(Y1 ~ a/(1+exp(k*(b-X1))), start = c(a=18400, k=0.61, b=15.5),
               correlation = corAR1())
summary(modEM1a)
shapiro.test(residuals(modEM1a)) ## Normalidade dos resíduos
#####
## modEM3: Modelo von Bertalanffy
modEM3 <- nls(Y1 ~ a*(1-(exp(k*(b-X1)))/3)^3, start = c(a=22000, k=0.2, b=14))
summary(modEM3)
shapiro.test(residuals(modEM3)) ## Normalidade dos resíduos
MGEM3=attr(modEM3$m$fitted(),"gradient")
mlgEM3=lm(Y1~ -1 +MGEM3)
bptest(mlgEM3) ## Homocedasticidade dos resíduos
dwtest(mlgEM3) ## Independência dos resíduos
#####
## Modelo von Bertalanffy AutoRegressivo
modEM3a <- gnls(Y1 ~ a*(1-(exp(k*(b-X1)))/3)^3, start = c(a=22000, k=0.2, b=14.5),
               correlation = corAR1())
summary(modEM3a)
shapiro.test(residuals(modEM3a)) ## Normalidade dos resíduos
#####
plot(X1,Y1)
lines(X1,fitted(modEM1),col="blue")
lines(X1,fitted(modEM2),col="yellow")
lines(X1,fitted(modEM3),col="brown")

```

## APÊNDICE D – Conversão de energia

Tabela D.1 – Fatores de Conversão de Energia

Multiplica Por de	para ↗	Tonelada Equivalente de Petróleo (tep)	Joule (J)	Quilowatt-hora (kWh)	Caloria (cal)
1 tep		1	$4,1868 \times 10^{10}$	$1,163 \times 10^4$	$10^{10}$
1 J		$2,388 \times 10^{-11}$	1	$2,778 \times 10^{-7}$	0,2388
1 kWh		$8,598 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^6$	1	$8,6 \times 10^5$
1 cal		$10^{-10}$	4,1868	$1,163 \times 10^{-6}$	1

Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2020).

Terawatt-hora:  $1 \text{ TWh} = 10^9 \text{ Wh}$