



DESENVOLVIMENTO DE SERVIÇOS CLIMÁTICOS PARA RECURSOS SOLAR E EÓLICO PARA DIVERSAS ESCALAS E PÓSSIVEIS IMPACTOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Relatório 4/5 - Quantificação da Disponibilidade Futura do
Recurso Solar no Brasil – Análises e Resultados Preliminares

Graziela Luzia

Elaborado por: **Graziela Luzia**

Essa publicação foi realizada por uma equipe formada por consultores independentes sob a coordenação da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio do projeto Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI).

Este projeto foi pactuado no âmbito da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio da parceria entre o Ministério do Meio Ambiente do Brasil e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), no âmbito da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI, sigla em alemão), do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU, sigla em alemão).

Participaram desse processo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Empresa Eletrosul/ Eletrobrás e a Defesa Civil de Santa Catarina.

Todas as opiniões aqui expressas são de inteira responsabilidade dos autores, não refletindo necessariamente a posição da GIZ e do MMA. Este documento não foi submetido à revisão editorial.

EQUIPE TÉCNICA - MMA

Hugo do Valle Mendes (coordenação)
Adriana Brito da Silva
Jaqueline Leal Madruga

EQUIPE TÉCNICA - GIZ

Ana Carolina Câmara (coordenação)
Eduarda Silva Rodrigues de Freitas
Pablo Borges de Amorim

EQUIPE TÉCNICA - EPE

Angela Livino
Jeferson Soares
Gustavo Brandão
Haydt de Souza

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

André Rodrigues Gonçalves
Rodrigo Costa

Ministério do Meio Ambiente

Esplanada dos Ministérios, Bloco B, Brasília/DF, CEP
70068-901
Telefone: + 55
61 2028-1206

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sede da GIZ: Bonn e Eschborn
GIZ Agência Brasília
SCN Quadra 01 Bloco C Sala 1501
Ed. Brasília Trade Center - 70.711-902 Brasília/DF
T + 55-61-2101-2170
E giz-brasilien@giz.de
www.giz.de/brasil

A encargo de:

Ministério Federal do Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) da Alemanha

BMU Bonn:

Robert-Schuman-Platz 3
53175 Bonn, Alemanha
T +49 (0) 228 99 305-0

Diretora de Projeto:

Ana Carolina Câmara

T +55 61 9 99 89 71 71
T +55 61 2101 2098

E ana-carolina.camara@giz.de



Sumário

1. Introdução.....	2
2. Descrição do Produto.....	5
3. Metodologia	7
3.1 Dados.....	7
3.1.1 Atlas Brasileiro de Energia Solar	7
3.1.2 MERRA-2	8
3.1.3 CFSR	9
3.1.4 ERA5.....	9
3.2 Mapa de Quantis	10
4. Resultados.....	14
5. Considerações Finais.....	21
6. Referências Bibliográficas	23
ANEXO 1 : Irradiância global horizontal (W.h/dia.m ²)	25

1. Introdução

Este documento apresenta o relatório da elaboração do Produto 4, “Quantificação da disponibilidade futura do recurso solar no Brasil – análises e resultados preliminares”, fruto da consultoria contratada pela Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ) no Brasil e Ministério do Meio Ambiente (MMA) no âmbito do projeto “Ampliação dos Serviços Climáticos em Investimentos de Infraestrutura” (CSI), subprojeto “Desenvolvimento de serviços climáticos para recursos solar e eólico para diversas escalas e possíveis impactos de alterações climáticas”.

O produto em questão é sequencial ao produto 3 e ambos formam uma base de dados consolidada que permite a remoção de vieses das simulações climáticas dos recursos eólico e solar, a serem realizadas, respectivamente, nos produtos 5 e 6 da consultoria. Ainda que os modelos climáticos apresentem hoje um progresso considerável na representação da circulação atmosférica, todos eles são afetados por estes vieses em um grau que inviabiliza o seu uso direto, sem ajustes, especialmente em estudos de mudanças climáticas (EHRET *et al.*, 2012).

Analogamente ao produto 3 (MMA E GIZ, 2019), para superar este problema, correção de vieses das saídas dos modelos ajustada por observações é um procedimento padrão nestes estudos. Entretanto, diferentemente do produto eólico, em que a utilização de dados de reanálises pode ser vantajosa, uma vez que já é popularmente utilizada em estudos de recursos energéticos deste setor (STAFFELL e PFENNINGER, 2016), o mesmo não se pode dizer para o produto solar. Ainda que as vantagens de se usar reanálises - alta resolução temporal e espacial, séries longas com cobertura global, sem dados faltantes, dados acessíveis - sejam as mesmas para as duas variáveis, é a qualidade do dado de irradiância que pesa contra.

A qualidade do dado de irradiância fornecida pelas reanálises é geralmente menor do que a de produtos de satélites (URRACA *et al.*, 2018). Reanálises combinam dados estimados de um modelo de Previsão Numérica do Tempo (PNT)

com observações no solo e de satélite. Além disso, um modelo de assimilação de dados usa registros do passado para limitar ou guiar as próximas previsões do modelo de PNT. Essas variáveis assimiladas geralmente incluem temperatura, velocidade do vento, pressão ou umidade relativa (campos analisados), mas o modelo de PNT também produz vários parâmetros que não são diretamente observados, ou seja, são somente saídas do modelo (campos previstos). Este é o caso da radiação de onda curta incidente, que é obtido pelo modelo de transferência radiativa, que simula a atenuação da irradiância do topo da atmosfera até o solo (URRACA *et al.*, 2018). Neste caso, a qualidade do dado depende do modelo de transferência radiativa utilizado, além de vários outros fatores, como a representação de nuvens, assimilação de aerossol e vapor de água, que aumentam a incerteza da estimativa da variável na superfície (ZHAO, LEE e LIU, 2013).

O uso de modelos de transferência radiativa devidamente validados com dados observados permite o conhecimento da distribuição espacial do recurso solar em grandes extensões territoriais (MARTINS, PEREIRA e ABREU, 2007). Dados de modelos satelitais, quando comparados com dados de boa qualidade, coletados em superfície e interpolados entre estações a mais de 30 km entre si, apresentam menores incertezas do que os dados observados (PEREIRA *et al.*, 2017). Os produtos de satélite, por sua vez, possuem o inconveniente de não terem disponíveis séries longas, como de 30 anos de dados que são necessários para produzir a base de dados solicitada. O Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) produziu em 2017 um produto de alta qualidade – Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017) -, com 17 anos de dados de irradiação solar. Esta série não é suficiente para ser utilizada diretamente como produto, porém, servirá para corrigir uma série de 30 anos de dados de reanálises, através de uma técnica chamada de mapa de quantis. A ideia básica é que esse dado seja corrigido ponto a ponto pelo que se tem de melhor e a disposição, mas sem alterar o sinal que esta climatologia carrega para que a mesma represente corretamente o período histórico com o

qual serão ajustados os modelos climáticos que serão utilizados nas projeções do produto 6.

Apenas para seguir uma padronização, buscou-se utilizar os mesmos conjuntos de reanálises do produto 3, a saber: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA-2), European Centre for Medium-Range Weather Forecast Re-Analysis (ERA5) e Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). Diferentemente do produto 3, desta vez não se realizou uma combinação entre reanálises, mas o melhor conjunto de dados foi o escolhido para receber a correção. Isto foi possível devido ao fato de se ter um mapa de observações (dados do Altas) para que o ajuste fosse realizado ponto a ponto na grade da reanálise em vez de amostragem estatística como no produto 3 (MMA E GIZ, 2019), dispensando assim a combinação dos diferentes conjuntos de reanálises. Os critérios para esta definição são explicados no decorrer deste relatório.

O produto 4 é, portanto, constituído de um conjunto de dados de reanálises que, embora apresente melhorias para irradiância nas versões mais recentes (PFENNINGER e STAFFELL, 2016; URRACA *et al.*, 2018), ainda possui alguma desvantagem em relação aos produtos de satélite. Todavia, esta base quando ajustada ponto a ponto por um dado validado e robusto, passa a ter características muito próximas ao mesmo e qualifica-se para servir de base de dados consolidada. Através desta base serão feitos os ajustes necessários aos modelos numéricos de clima, a fim de se diminuir as incertezas associadas às projeções de possíveis alterações no recurso solar em decorrência das mudanças climáticas futuras.

O objetivo deste relatório é fornecer as informações necessárias, desde a origem dos dados, as incertezas e a metodologia utilizada para seu desenvolvimento até as especificações finais do produto. De forma geral, o produto consta de uma base consolidada de dados, em frequência mensal, do total diário da irradiação global horizontal para todo o território brasileiro, e dos mapas incluídos nos resultados deste relatório.

A seção 2 apresenta a descrição do produto; a seção 3 descreve a metodologia utilizada, enquanto a seção 4 apresenta os resultados. As considerações finais são apresentadas na seção 5.

2. Descrição do Produto

No âmbito do subprojeto CSI/GIZ "Desenvolvimento de serviços climáticos para recursos solar e eólico para diversas escalas e possíveis impactos de alterações climáticas", são necessários dados observacionais de boa qualidade que subsidiem a análise da disponibilidade futura dos recursos energéticos renováveis no Brasil. O estudo dos possíveis impactos nos recursos energéticos renováveis, tema dos produtos 4 e 5 previstos para o final desta consultoria, se dará através da utilização de simulações climáticas, comparando projeções futuras de vento e irradiação solar com resultados obtidos para o período histórico.

Simulações de mudanças climáticas baseadas em modelos climáticos inevitavelmente carregam incertezas. Para diminuir substancialmente estas incertezas, é fundamental que o período histórico das simulações seja validado utilizando-se bases de dados observacionais consolidadas. De acordo com o Termo de Referência desta consultoria, para o produto 4 é solicitado o desenvolvimento de:

"Base de dados observacionais, consolidada em escala mensal a partir da combinação de conjuntos de reanálises e medições de superfície, contendo a distribuição da variável irradiação solar gerada a partir dos dados em resolução temporal original e em resolução espacial compatível com as saídas dos modelos climáticos refinados."

Para compor a base climatológica, uma série de dados de irradiação longa e de boa qualidade se faz necessário. Os melhores dados de irradiação geralmente são os produtos provenientes de satélites, como por exemplo, os dados do Atlas Brasileiros de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017). O inconveniente desta série, no entanto, é que além do período disponibilizado (1999-2015) não coincidir com o

período histórico dos modelos (1979-2005) que serão utilizados nos produtos 5 e 6, a série possui apenas 17 anos de dados. A Organização Meteorológica Mundial recomenda que se utilize 30 anos de dados meteorológicos (WMO, 2017) para que se tenha uma média representativa, levando-se em conta as variabilidades climáticas interanuais e interdecadais que podem levar a interpretações enviesadas. Para resolver este problema, uma longa série de dados diários de reanálise, utilizando-se de técnica de remoção de viés, foi ajustada considerando-se os dados do Atlas como sendo a verdade, uma vez que trata-se de uma série relativamente longa e cuidadosamente validada. Conforme comentado, reanálises não costumam apresentar bons dados de variáveis radiativas. Entretanto, se as séries observada e reanálise estiverem bem correlacionadas, o método aqui utilizado apresenta excelentes resultados para o ajuste. Os detalhes deste ajuste e a metodologia completa são apresentados na Seção 3 deste relatório.

O produto do ajuste da reanálise com os dados do Atlas é uma base climatológica da variável irradiação solar, em escala mensal, na mesma resolução dos modelos climáticos (Tabela 1). A principal justificativa para este produto é que estes dados são importantes para se avaliar e compreender as incertezas associadas às estimativas produzidas por estes modelos numéricos de clima que serão utilizados na geração de dados e próximos produtos da consultoria.

As informações a seguir tratam das especificações do produto 4.

Tabela 1: Metadados do produto 4.

METADADOS PARA RCorr.nc e RCorr.xlsx	
Nome do dado	Reanálise Corrigida
Título	Produto 4 - Base de Dados Consolidada
Origem	LABREN (Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia)
Descrição	Climatologia mensal do total diário da irradiação global horizontal para todo o território brasileiro
Parâmetros	Irradiação global horizontal [W.h/dia.m ²]
Frequência	mensal
Resolução espacial	0,2° lat x 0,2° lon; 201 pontos em x / 196 pontos em y
Dimensões da grade	-74W , -34W ; -34S , 5N
Formato	xlsx e netcdf
Consultora responsável	Graziela Luzia graziela.luzia@inpe.br

3. Metodologia

3.1 Dados

3.1.1 Atlas Brasileiro de Energia Solar

Produzido pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em colaboração com outras instituições no Brasil, o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017) (neste trabalho referenciado apenas como "Atlas"), em sua segunda edição empregou mais de 17 anos de dados satelitais, além de implementar vários avanços nas parametrizações no modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, visando melhorar ainda mais a acurácia da base de dados disponibilizada para acesso público. O modelo BRASIL-SR foi desenvolvido no LABREN e utiliza dados de cobertura de nuvens obtidos a partir de imagens digitais do satélite geostacionário GOES. Além destas informações, o modelo utiliza dados

climatológicos de temperatura, umidade relativa e visibilidade atmosférica para todo o território brasileiro. Os resultados produzidos pelo modelo foram validados estatisticamente com dados medidos por piranômetros na rede nacional de estações meteorológicas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Sistema Nacional de Dados Ambientais (rede SONDA/INPE). Todas as estimativas fornecidas passam por um cuidadoso processo de validação cujos detalhes podem ser vistos no próprio Atlas, disponível em http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Os conjuntos de dados utilizados foram referentes ao período 1999-2015, em frequência diária e mensal, ambos para a variável "irradiância global horizontal". A resolução original do dado em 10 km foi reamostrada para 20 km.

3.1.2 MERRA-2

O MERRA (GELARO *et al.*, 2017), já na versão 2, disponibiliza dados a partir de 1980 até os dias atuais e é a última reanálise atmosférica do satélite da era moderna produzido pela NASA's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). A versão 2 veio para substituir a versão MERRA, que agora contém assimilação de dados de radiância hiperespectral e observações de microondas, além de conjunto de dados de sistema de posicionamento global GPS (do inglês, Global Position System) e rádio-ocultação. Foram também incluídos perfis de observação de ozônio.

O MERRA-2 é produzido com o sistema de assimilação de dados Goddard Earth Observing System (GEOS). A componente chave deste sistema é o modelo atmosférico GEOS e o esquema de análises Gridpoint Statistical Interpolation (GSI). Maiores detalhes na documentação do MERRA-2 (GELARO *et al.*, 2017). Para adquirir estes dados, deve-se acessar a página GES-DISC (<http://disc.gsfc.nasa.gov/datasets>).

Para a etapa de calibração, foram baixados dados do MERRA-2 para um total de 17 anos (de 1999 a 2005 de dados horários). A variável selecionada foi a *surface incoming shortwave flux*.

3.1.3 CFSR

O Climate Forecast System Reanalysis (SAHA *et al.*, 2006), tem duas versões: a primeira CFSR cobre o período de 1979 até março de 2011 e a versão CFSRv2 cobre de 2011 até o período presente. Em relação às reanálises anteriores, o CFSR apresentou algumas vantagens no momento em que foi publicado, como acoplamento oceano-atmosfera na geração do campo da análise, implementação de um modelo interativo gelo-oceano e assimilação de radiâncias de satélite por esquema de interpolação estatística. A resolução espacial é de aproximadamente 38 km. Para obter estes dados do CFSR, é preciso solicitar na página da National Center for Atmospheric Research (NCAR) Research Data Archive (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>).

Para o CFSR foram baixados dados de cada 6h, também do período de 1999 a 2015, reamostrando para a resolução padrão do produto final a grade das duas versões (CFSR e CFSRv2), que possuem resoluções diferentes, e então unindo-as para compor uma única série. A variável solicitada foi a *downward shortwave radiation flux*.

3.1.4 ERA5

A European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis em sua mais recente versão (ERA5) é o mais novo produto de reanálises do ECMWF e está em processo de substituir o ERA-Interim (previsto de completar o processo de substituição até o final de 2019). O ERA5 cobre desde 1979 até 2 ou 3 meses antes do período atual. Ele foi produzido utilizando o esquema de assimilação de dados 4D-Var no CY41R2 do modelo ECMWF Integrated Forecast System (IFS).

A resolução espacial do ERA5 é de 31 km ($\sim 0,28^\circ$) e os dados são disponibilizados em uma plataforma amigável na página do projeto Copernicus Climate Change Service Data Store – CDS (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/>). Entretanto, para poder fazer download de recortes geográficos e de longos conjuntos de dados, como foi

o caso, é mais apropriado utilizar a área chamada de Application Program Interface (API), o que na prática significa baixar via script em linguagem Python, que é disponibilizado também na página. Para a etapa de calibração foram solicitados dados do período compreendido entre 1999 e 2005 (17 anos) em resolução temporal horária, que depois viriam a ser transformados em médias diárias. Para a etapa de ajuste, foram solicitados dados do período compreendido entre 1979 e 2005 (27 anos), em resolução temporal mensal. A variável selecionada foi a *surface solar radiation downwards*. Todos os dados foram recortados e remapeados para a grade padrão do produto (20 km).

3.2 Mapa de Quantis

A base de dados foi corrigida utilizando-se uma técnica de refinamento estatístico, mais conhecida originalmente como Downscaling Estatístico, cuja ideia básica é revelar uma relação estatística entre as simulações de um modelo climático e as observações para o período histórico. Essa relação é sintetizada em uma função de transferência que será então aplicada aos modelos regionais ou globais permitindo projeções na escala local e correções de viés dos modelos (Figura 1). Entre diferentes métodos de downscaling estatístico, particularmente do tipo não-paramétrico (empírico), vários autores apontam o método chamado de Mapa de Quantis (MQ) como sendo aquele com o melhor desempenho (THEMEBL, GOBIET e LEUPRECHT, 2011; GUDMUNDSSON *et al.*, 2012; TEUTSCHBEIN e SEIBERT., 2012; RÄTY, RÄISÄNEN e YLHÄISI, 2014). O método se baseia em corrigir erros em toda a distribuição da simulação do modelo (BOÉ *et al.*, 2007). O enésimo quantil da distribuição do modelo é trasladado para o enésimo quantil da distribuição do dado observado, baseado em dados observados e simulados em um dado período de referência. Este ajuste aplicado durante a correção da distribuição, corrige concomitantemente erros sistemáticos do modelo (correção de viés) e relacionados a escala espacial (downscaling).

Uma desvantagem, no entanto, pode ser oferecida no caso de grande diferença de resolução espacial entre dado simulado e observado, conforme apresentado por Maraun (2013). O autor apresentou esta fraqueza para o uso de MQ entre um

modelo regional com 25 km de resolução espacial e mais de 20 estações ocupando o espaço fechado entre quatro pontos de grade adjacentes, sugerindo que o método exagera a frequência de extremos altos enquanto os extremos baixos da distribuição são super corrigidos. Esta desvantagem foi desconsiderada neste trabalho devido ao fato de que, embora downscaling e correção de viés sejam ambos produtos da aplicação do método, o segundo é muito mais objetivo deste trabalho do que o primeiro. Isso se deve ao fato de a base de dados final ter resolução de 20 km, o que não é muito superior ao dos conjuntos de reanálises em sua resolução original (entre 30 e 40 km).

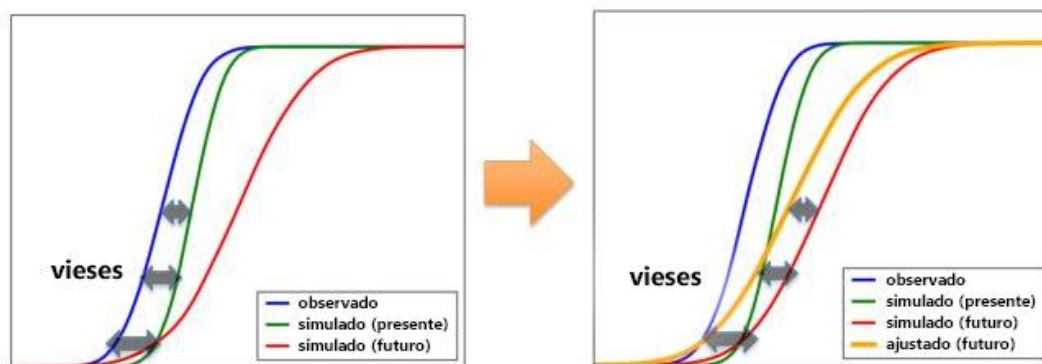


Figura 1: Esquema representativo da técnica de downscaling estatístico. Do ajuste entre dado observado e simulado no tempo presente, obtém-se a função de transferência que irá ditar o ajuste para o dado simulado no tempo futuro.

Uma abordagem comum é, ao invés de supor que a variável tenha uma distribuição conhecida (por exemplo: distribuição normal, gama, weibull, etc), utilizar-se Função de Distribuição Acumulada (do inglês, Cumulated Distributed Function - CDF) Empírica não paramétrica para os valores observados e modelados. Seguindo a definição de Boe et al. (2007) CDFs empíricas são aproximadas utilizando-se valores tabelados dos percentis, enquanto valores entre dois percentis são aproximados utilizando-se modelo de interpolação linear. Neste trabalho, utilizou-se esta abordagem não paramétrica de mapa de quantis, guiando-se parcialmente na metodologia adotada em Rajczak et al. (2016) para os passos de calibração e aplicação do ajuste, porém, com implementação do algoritmo levemente diferente da utilizada pelos autores.

A série temporal X do modelo original no tempo mensal (t) e local (s) é corrigida para uma série Y de acordo com:

$$Y_{t,s} = eCDF_{d,s}^{obs,cal-1} [eCDF_{d,s}^{mod,cal}(X_{t,s})] \quad \text{Equação 1}$$

Onde eCDF é a CDF empírica, obs refere-se a observações e mod refere-se a modelo original (ou reanálise), ambos no período de calibração (cal) para cada dia (d) do mês. A figura 2 representa este processo no domínio do tempo.

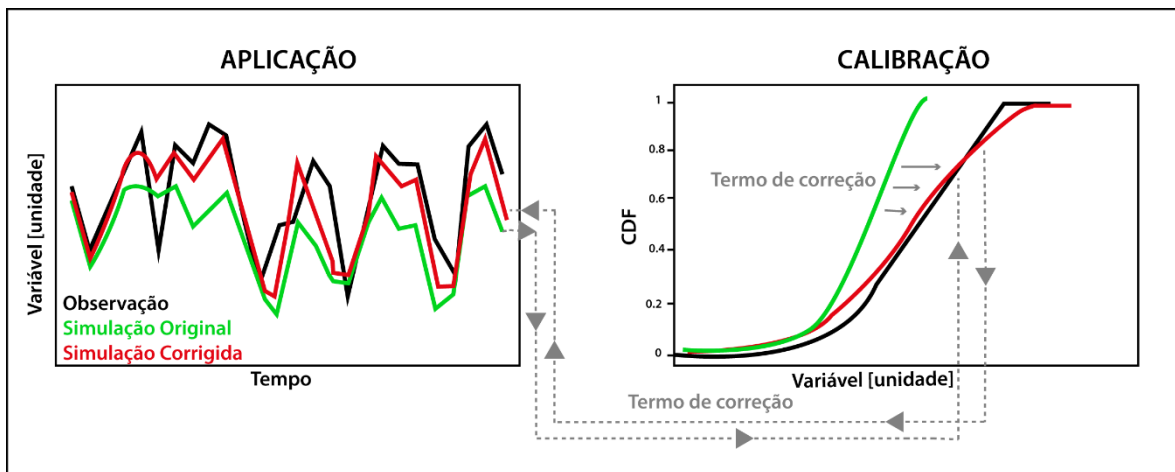


Figura 2: Esquema representativo do ajuste por mapa de quantis. A série temporal X da Equação 1 pode ser interpretada como a Simulação Original (linha verde) na figura. Sua CDF é apresentada na etapa de calibração sendo ajustada por um termo de correção obtido por MQ. A CDF ajustada (linha vermelha) funciona como se a série temporal Y da Equação 1 estivesse ajustada com a Observação (linha preta) na etapa de Aplicação. A figura é apenas ilustrativa e na prática o método corrige a média e a variância da série temporal original. Adaptada de Santander Meteorology Group.

Disponível em:

www.meteo.unican.es/work/downscaler/slides/2nd_day/3_renate.pdf

A implementação do algoritmo é baseada em percentis empíricos (1 ao 99º percentil) do dia da série temporal, que transladam quantis da distribuição simulada em função da sua contrapartida observada. A função de correção entre estes 99 percentis é linearmente interpolada. Com a finalidade de entregar o produto final na frequência mensal, os ajustes são calculados mensalmente levando-se em conta todos os valores diários da série para compor a CDF. De posse dessas funções de correção (de fato, os coeficientes da função) que determinam

a diferença entre observado e simulado, que deverá ser calculada para cada mês e em cada ponto de grade, as mesmas podem ser aplicadas aos dados a serem ajustados, seja no passo de calibração ou de ajuste. Um resumo das etapas principais que compõem este trabalho é dado a seguir:

1) Escolha dos dados: como já mencionado, buscou-se utilizar os mesmos conjuntos de reanálises do produto 3. Entretanto, diferentemente deste, o produto 4 não incluiu uma combinação dos conjuntos de dados, mas sim, apenas o melhor deles foi escolhido para ser ajustado. O critério para escolha baseou-se na melhor correlação temporal apresentada entre as reanálises na frequência diária e para todo o território brasileiro em comparação com dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar. A justificativa para esta escolha é que o sucesso do ajuste por MQ está relacionado ao coeficiente de correlação. Segundo RAJCZAK et al. (2016), correlação é uma medida de similaridade independente de vieses na média ou na variância, mas aborda explicitamente semelhanças na estrutura temporal da série. Além disto, MQ com abordagem de correção de viés corrige erros de média e variância, mas não erros de correspondência diária. Portanto, para que o ajuste seja o melhor possível, deve-se evitar erros na estrutura temporal entre as séries (RAJCZAK et al., 2016). Para cada uma das reanálises R, o índice de correlação C foi calculado em toda a série temporal t e em cada ponto de grade x,y entre as séries observada O e reanálise R de acordo com:

$$C(x, y) = \frac{\sum_t R(t,x,y) * O(t,x,y) - \overline{O(t,x,y)} * \overline{R(t,x,y)}}{\sqrt{(\sum_t O(t,x,y)^2 - \overline{O(t,x,y)}^2) * (\sum_t R(t,x,y)^2 - \overline{R(t,x,y)}^2)}} \quad \text{Equação 2}$$

2) Calibração: a série de praticamente 30 anos de dados mensais da reanálise com a melhor correlação temporal na série diária deve ser submetida a correção de viés. Para isto, funções de transferência foram determinadas a partir da etapa de calibração. Esta etapa consiste em ajustar os dados da reanálise na frequência diária a partir de dados “observados” no período de calibração. Os dados observados referem-se aos dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar e o período de calibração são os 17 anos de dados disponíveis (subseção 3.1). A premissa aplicada no método MQ é a de estacionariedade do viés do modelo, que assume que a função de correção calibrada também o seja. Essa suposição é incerta,

especialmente sob mudanças climáticas (MARAUN, 2013). Embora ela possa contribuir com mais incertezas nas projeções, ela permite que a correção calibrada no período histórico dos modelos seja aplicada a séries inteiras simuladas, incluindo cenários contíguos ou não. Aqui ela foi calibrada no período 1999-2015 e aplicada no período 1979-2005.

3) Ajuste: uma vez que o ajuste realizado no período de calibração resultou em uma boa concordância entre dado observado e reanálise para todos os meses, cada ponto de grade deve ter gerado os coeficientes das funções de transferência. Estas funções servirão para ajustar os dados mensais da série climatológica a fim de obter o produto final para toda a grade. A Figura 3 representa esquematicamente todas estas etapas.

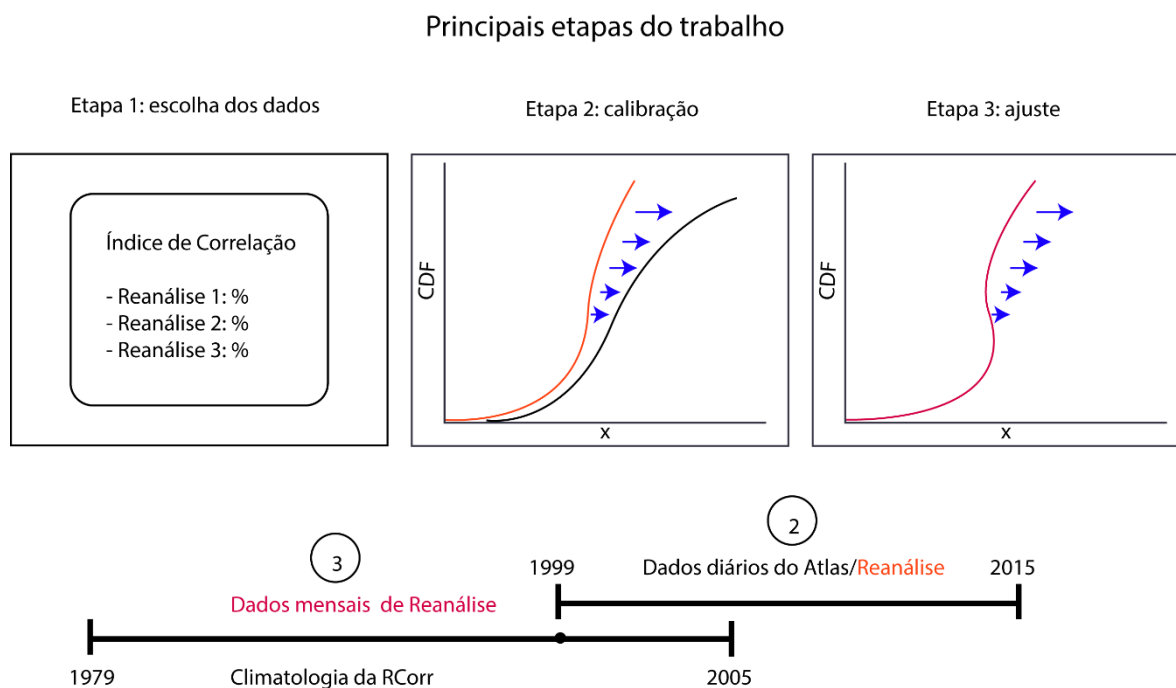


Figura 3: Representação esquemática das etapas do trabalho.

4. Resultados

A primeira etapa do trabalho consistiu em determinar qual dos três conjuntos de reanálises (MERRA-2, CFSR e ERA5) seria escolhido para constituir a base final. O

critério de escolha adotado foi baseado na relação entre o sucesso do ajuste por mapa de quantis e dados bem correlacionados temporalmente. Uma vez que dado observado e reanálise tenham uma estrutura temporal previamente bem correlacionada, a chance de que as funções de transferência façam uma boa correção na etapa de ajuste são mais favoráveis.

A Figura 4 compara as séries diárias dos três conjuntos de reanálises com dados do Atlas para os 17 anos de dados diários.

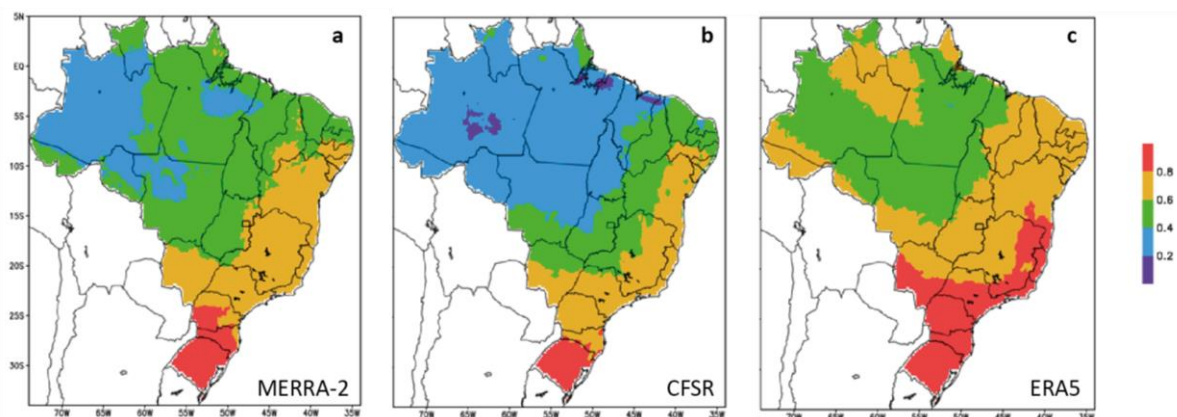


Figura 4: Índice de correlação temporal entre dados diários de irradiação total do Atlas Brasileiro de Energia Solar e reanálises a) MERRA-2; b) CFSR e c) ERA5.

De acordo com o resultado da Figura 4, o ERA5 apresentou a melhor correlação temporal na série diária com os dados do Atlas. Os valores para o coeficiente de correlação entre as séries temporais calculados para cada ponto de grade foram iguais ou superiores em todo o território brasileiro para este dado (Figura 4-c), e por este motivo foi o escolhido para receber o ajuste e compor a base final. Este resultado era razoavelmente esperado, e concorda com um estudo recente (URRACA *et al.*, 2018), que demonstrou que o ERA5, quando comparado com o produto anterior (ERA-interim) e, principalmente, quando comparado com o MERRA-2 e outros conjuntos de reanálises e produtos derivados de satélites, apresentou uma significativa redução do seu viés positivo sobre o Brasil, especificamente sobre as cidades de Brasília, Petrolina e Florianópolis. Globalmente, os autores afirmam que este conjunto de reanálise se apresenta com um viés médio positivo até 50% menor que seu antecessor Era-Interim (+10,05

W/m^2) e menor ainda do que o MERRA-2 ($+11,34W/m^2$), e isso provavelmente se dá graças a melhorias no modelo numérico de previsão de tempo e de assimilação de dados, bem como ao aumento das resoluções horizontal, vertical e temporal.

A segunda etapa é a de calibração e consiste em ajustar os dados da reanálise recém escolhida com os dados do Atlas. Primeiramente, os dados diários de irradiância obtidos através do Atlas Brasileiro de Energia Solar são processados para ficarem no mesmo padrão do dado de reanálise e ambos serem lidos pelo algoritmo para a contabilização dos percentis em cada ponto da grade, organizados por mês. O script ajusta a CDF do dado da reanálise ao dado observado e da diferença entre os dois é obtida uma função de transformação. Esta função é definida para cada ponto e armazenada. A Figura 5 ilustra esta etapa do trabalho.

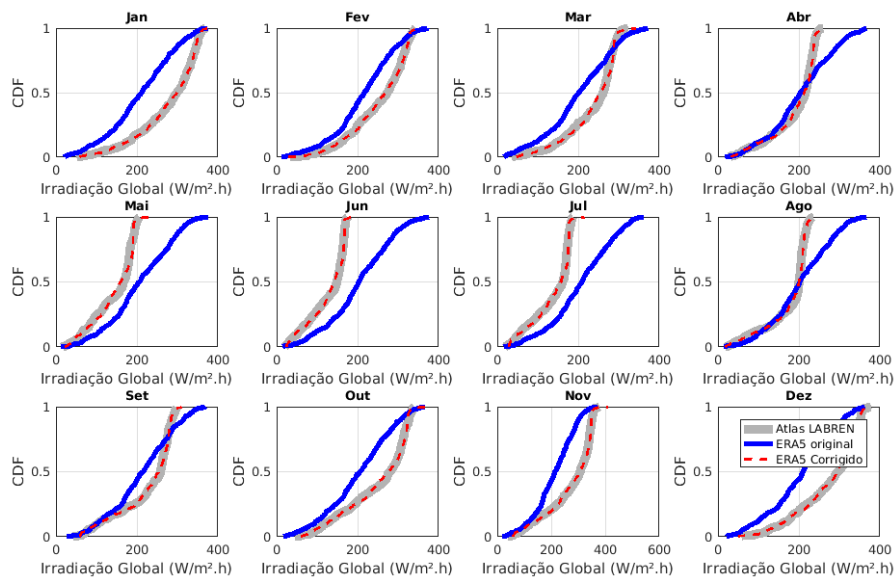


Figura 5: Detalhe do funcionamento do script. A cada ciclo, as CDFs são calculadas para a série observada (Atlas, linha cinza) e para a simulada (ERA5 original, linha azul). O script contabiliza todos os dias do mês que possuem dados e então realiza o ajuste. Na figura, os 12 meses foram calculados, ajustados (ERA5 corrigido, linha vermelha pontilhada) e plotados para um ponto qualquer. Este procedimento se repete para todos os pontos da grade.

Ao final deste procedimento, devemos checar o resultado do ajuste da reanálise que, a princípio, vamos chamar de ERA5-Corrigido, em contrapartida com sua versão original ("ERA5"). Importante destacar que o período de calibração compreendeu desde 01 de janeiro de 1999 a 31 de dezembro de 2015. O resultado do dado ajustado é uma série com médias mensais de todo o período mencionado. Para comparar os resultados foram feitas médias mensais a partir dos dados diários com os dados do Atlas e de ERA5. As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados para a irradiação global horizontal para o Atlas, ERA5 e ERA5-Corrigido.

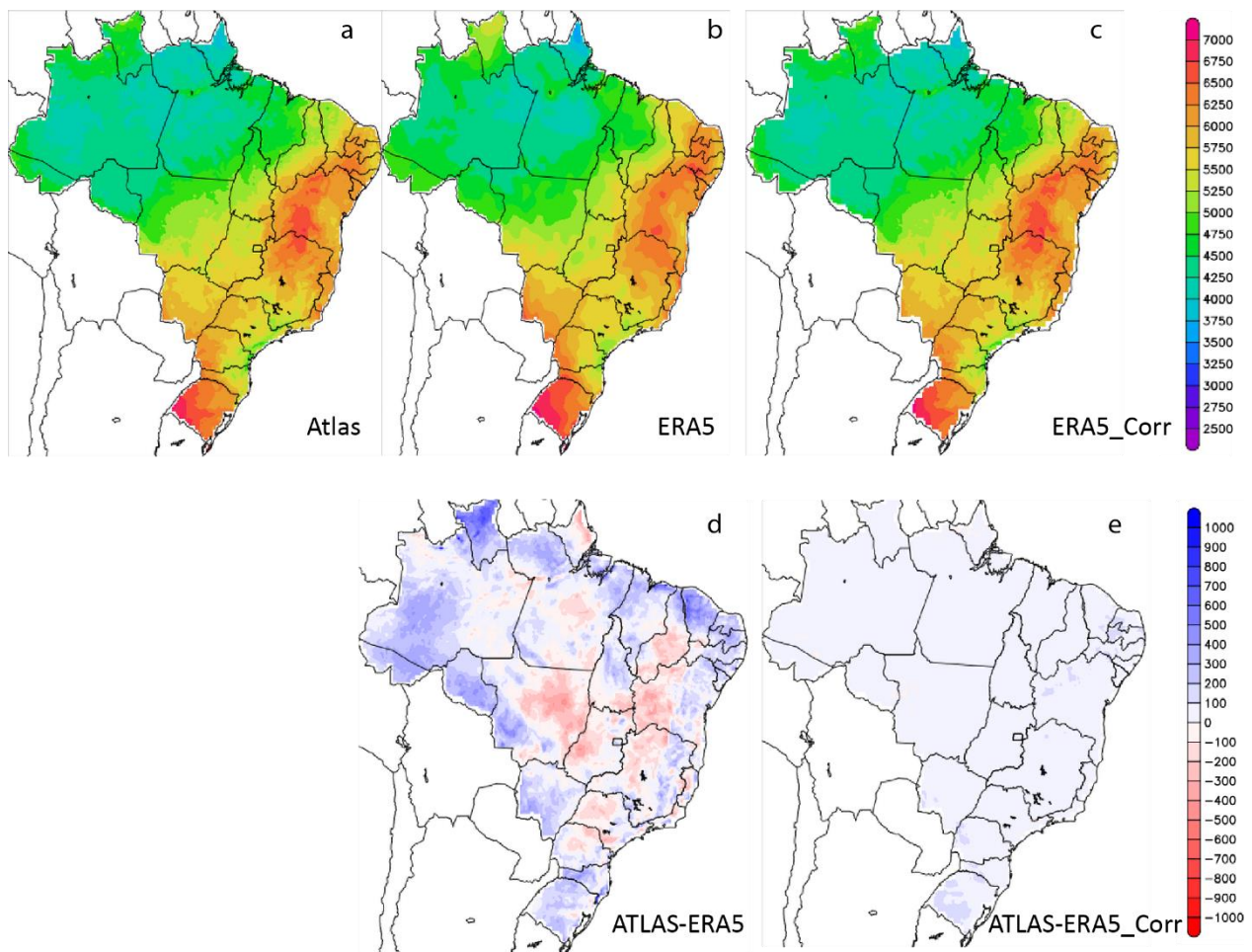


Figura 6: Irradiação global horizontal (W.h/dia.m²) para a) Atlas; b) ERA5 dado original e c) ERA5-Corrigido para o mês de janeiro. Viés da irradiação global horizontal (W.h/dia.m²) para d) ERA5 e e) ERA5-Corrigido.

O primeiro trimestre é o que apresenta a menor diferença entre os dados. O mês de janeiro é representativo do resultado do ajuste para o primeiro trimestre e é também o mês com o menor viés apresentado entre ERA5 e Atlas. A Figura 6 a-b-c mostra a semelhança na distribuição espacial entre os dados neste mês. A diferença pouco significativa é apresentada na Figura 6-d, com valores de viés positivos e negativos distribuídos por todo o território entre + ou - 100 até no máximo 500 W.h/dia.m². A Figura 6-e apresenta a diferença entre os dados ERA5 e Atlas após a correção, praticamente nula. Entretanto, em outros trimestres, vieses chegam a superar os 1000 W.h/dia.m², como é o caso do terceiro trimestre que é apresentado na Figura 7.

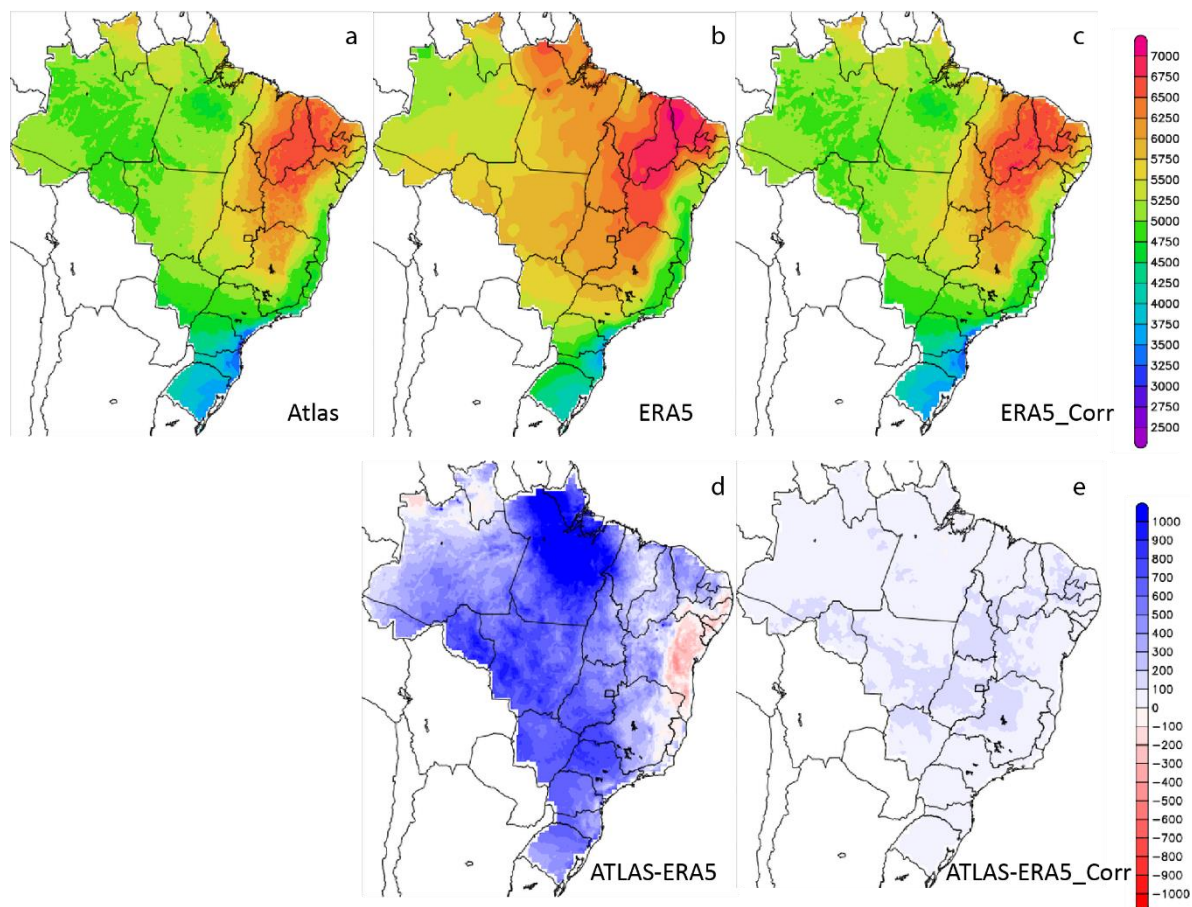


Figura 7: Irradiação global horizontal (W.h/dia.m²) para a) Atlas; b) ERA5 dado original e c) ERA5-Corrigido para o mês de setembro. Viés da irradiação global horizontal (W.h/dia.m²) para d) ERA5 e e) ERA5-Corrigido.

A Figura 7-a-b-c apresenta a comparação da distribuição espacial da irradiação global horizontal para o mês de setembro entre Atlas, ERA5 e ERA5 corrigido. A Figura 7-d apresenta o viés do ERA5 quando comparado ao Atlas para o mesmo mês de setembro. Exceto por alguma subestimativa moderada no nordeste do país, o que se percebe é viés positivo generalizado, ultrapassando a marca de 1000 W.h/dia.m² em alguns locais no norte do país. Estes erros percentuais acentuados, alguns até superiores a 20% foram substancialmente reduzidos após o ajuste, como pode ser visto na Figura 7-e. O mesmo acontece em todos os demais meses, com a redução quase que total dos erros após o ajuste. Todos estes resultados dos outros meses podem ser vistos na seção Anexos deste relatório. Com o ajuste realizado e o ERA5-Corrigido praticamente idêntico ao dado do Atlas para o período de 1999 a 2015, passou-se a próxima etapa.

A terceira etapa consistiu em aplicar o mesmo ajuste da etapa de calibração nos dados mensais da climatologia do ERA5 por MQ através das funções de transferência armazenadas na etapa anterior. O procedimento é praticamente o mesmo descrito na etapa de calibração, com a diferença de que a CDF do dado mensal é modificado pela função de transferência e então são obtidas a média e a variância da irradiância global horizontal para cada mês e gravado para o dado chamado de Reanálise Corrigida.

Pode-se dizer que este uso da metodologia é um pouco incomum. O mais usual é realizar a calibração no período histórico ou presente e efetuar os ajustes no período futuro de uma simulação de modelo. Neste trabalho, mapa de quantis foi utilizado para corrigir uma série de dados de um período no passado. Igualmente ao caso do período futuro, o ajuste aqui realizado não pode ser verificado. Entretanto, devido a relativa proximidade no tempo entre a climatologia (1979-2005) e a série de 17 anos (1999-2015), não se espera que as duas sejam muito diferentes nas médias mensais, a não ser pela variação no período devido a variabilidade climática natural.

A Figura 8 apresenta o total diário da irradiação global horizontal em médias mensais calculados a partir da Reanálise Corrigida.

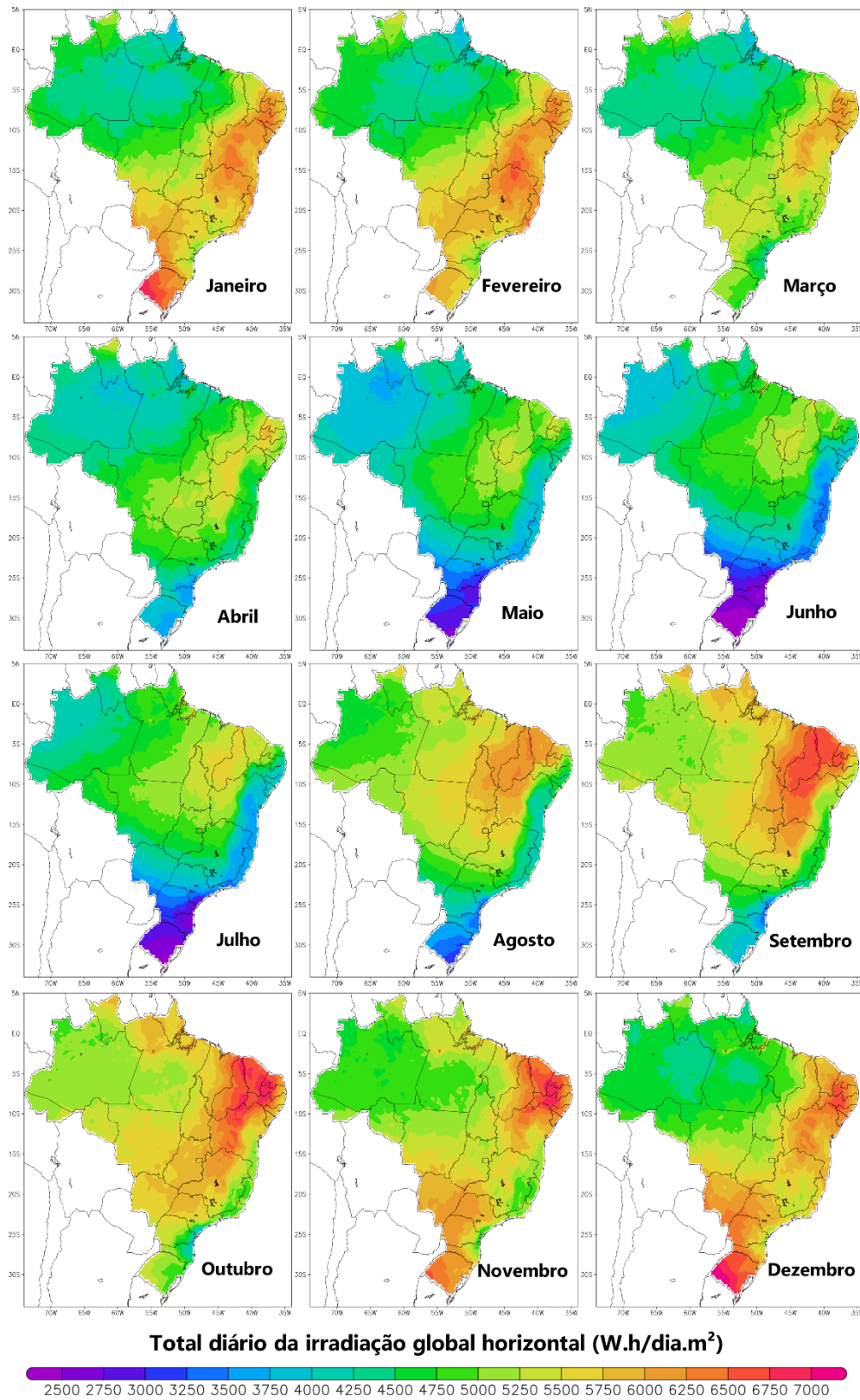


Figura 8: médias mensais do total diário da irradiação global horizontal para a Reanálise Corrigida.

5. Considerações Finais

A base de dados desenvolvida neste produto utilizou-se da técnica de downscaling estatístico empírico com o método de mapa de quantis, no qual erros na distribuição da simulação são corrigidos pelos da observação, trasladando quantis de acordo com funções de transferência obtidos para cada ponto e em cada período de referência. Uma série de 27 anos de dados mensais de reanálise (ERA5) foi corrigida utilizando-se como dado observado a série diária do Atlas Brasileiro de Energia Solar, com 17 anos de dados incluindo informações de satélite e estimativas do modelo BRASIL-SR. O produto final se chama Reanálise Corrigida e seu objetivo é possibilitar a quantificação da disponibilidade futura do recurso solar no Brasil, através do ajuste das simulações dos modelos climáticos que irão gerar as projeções dos próximos produtos da consultoria.

Os resultados na primeira etapa do trabalho mostraram que o ERA5 é a reanálise que melhor se correlaciona com o Atlas para a Irradiância Global. Os valores para o coeficiente de correlação entre as séries temporais calculados para cada ponto de grade foram iguais ou superiores em todo o território brasileiro na comparação com MERRA-2 e CFSR, chegando a valores superiores a 80% em toda a região sul e parte da região sudeste do Brasil. Este resultado corrobora estudos que dizem que a versão "ERA5" apresentou melhorias e atualmente é a reanálise com menores vieses na América do Sul quando comparada a produtos derivados de satélite. Além disto, os resultados apresentados na Seção 4 deste trabalho mostram que o ERA5 é bastante semelhante ao Atlas nas médias de alguns meses do ano, especialmente no primeiro trimestre. Todavia, em outros meses a reanálise apresenta valores de viés bastante elevados (maiores que 20% de erros percentuais), sobretudo vieses positivos. A extensa maioria destes erros é removida com o ajuste por mapa de quantis no período de calibração. Para todas as médias mensais, vieses pontuais positivos não superam valores entre 100 e 200 (W.h/dia.m²) após este ajuste e o mesmo é então aplicado à série de 27 anos de dados mensais, base da Reanálise Corrigida.

A Reanálise Corrigida constitui-se em um instrumento útil para que se possa avaliar o recurso solar futuro para a geração de energia solar, podendo também ter outras aplicações que utilizem dados mensais de irradiação solar global na resolução espacial de 20 km.

6. Referências Bibliográficas

BOÉ, J. et al. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. **Int. J. Climatol.**, v. 12, n. 27, p. 1643-1655, 2007.

EHRET, U. et al. Should we apply bias correction to global and regional climate model data? **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 16, n. 9, p. 3391-3404, 2012.

GELARO, R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). **Journal of Climate**, v. 30, n. Special Collection, p. 5419-5454, 2017.

GUDMUNDSSON, L. et al. **Downscaling RCM precipitation to the station using quantile mapping - a comparison of methods**. *Hydrol. Earth Syst. Sci. [S.l.]*, p. 3383. 2012. (16).

MARAUN, D. Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: revisiting the inflation issue. **J. Climate**, v. 26, n. 26, p. 2137-2143, 2013.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. Sattelite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA Project. **Solar Energy**, v. 81, p. 517-528, 2007.

MMA E GIZ. **Quantificação da disponibilidade futura do recurso eólico no Brasil - análises e resultados preliminares. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI)**. Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Brasília, DF., p. 1-63. 2019.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ª edição. ed. São José dos Campos: LABREN/CCST/INPE, 2017.

PFENNINGER, S.; STAFFELL, I. Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalyses and satellite data. **Energy**, n. 114, p. 1251-1265, 2016.

RAJCZAK, J. et al. Robust climate scenarios for sites with sparse observations: a two-step bias correction approach. **Int. J. Climatol.**, n. 36, p. 1226-1243, 2016.

RÄTY, O.; RÄISÄNEN, J.; YLHÄISI, J. Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations.. **Clim. Dyn.**, v. 9-10, n. 42, p. 2287-2303, 2014.

SAHA, S. et al. The NCEP Climate Forecast System. **Journal of Climate**, v. 19, p. 3483-3517, 2006.

STAFFELL, I.; PFENNINGER, S. Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. **Energy**, v. 114, p. 1224-1239, 2016.

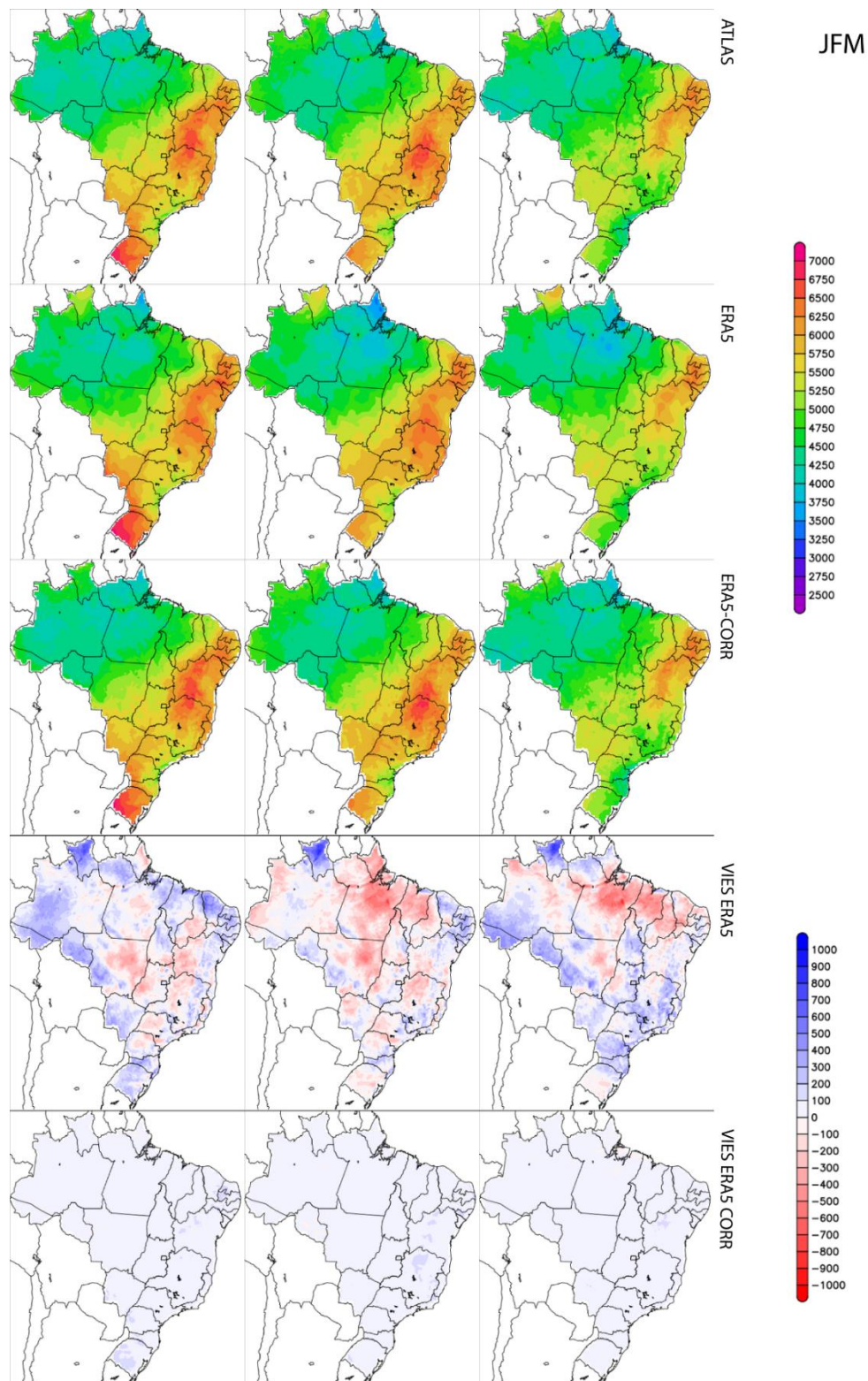
TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT., J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods.. **J. Hydrol.**, v. 456-457, n. 0, p. 12-29, 2012.

THEMEBL, M.; GOBIET, A.; LEUPRECHT, A. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. **J. Climatol.**, n. 36, p. 1226-1243, 2011.

URRACA, R. et al. Evaluation of Global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data. **Solar Energy**, n. 164, p. 339-354, 2018.

WMO. **WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals.** World Meteorological Organization. Geneva 2. 2017. (2017 edition).

ZHAO, L.; LEE, X.; LIU, S. Correcting surface solar radiation of two data assimilation systems against FLUXNET observation in North America. **J. Geophys. Res. Atmos.**, n. 118, p. 9952-9564, 2013.

ANEXO 1: Irradiância global horizontal (W.h/dia.m2)

AMJ

