

SPDRAD3 - SOLUÇÃO COMPUTACIONAL PARA EXPLORAÇÃO E ANÁLISE ESPACIAL DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR

Douglas Messias Uba – douglas.uba@inpe.br

Juan Carlos Ceballos

Rogério da Silva Batista

Simone Marilene Sievert da Costa Coelho

Renato Galante Negri

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil.

Resumo. Este trabalho apresenta o SPDRAD3 - Sistema de Processamento de Dados de Radiação Solar; Versão 3.0 Beta, uma solução computacional desenvolvida para coletar, processar, analisar e visualizar dados relacionados à radiação solar. Esses dados são obtidos por estações de coleta in-situ e também estimados por modelos a partir de imagens de sensoriamento remoto. Especificamente, o modelo físico utilizado é o modelo GL, desenvolvido pelo CPTEC/INPE, o qual utiliza-se de imagens do canal visível dos satélites da série GOES para produzir estimativas de irradiância solar global ao nível de superfície, com foco na América do Sul e oceanos adjacentes. A arquitetura do software é modular, composta por componentes interconectados, incluindo um banco de dados com suporte geoespacial, uma API de acesso aos dados, além de uma Aplicação de Exploração. O sistema apresenta-se como uma solução robusta e eficiente para a análise espacial de dados de radiação solar, contribuindo para os avanços na pesquisa e aplicação de energias renováveis, além de permitir a validação de modelos e a análise da qualidade das estações de coleta.

Palavras-chave: Radiação Solar; Sensoriamento Remoto; Banco de Dados.

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar (em suas diversas modalidades: global, direta e difusa) é reconhecida como a fonte principal da energia para fenômenos ambientais, meteorológicos e climáticos do planeta. Além disso, possui importante destaque em políticas energéticas de curto e longo prazos. Durante o século 20, as redes meteorológicas com medição de irradiância solar não foram densas nem estáveis. Diversos países, e.g. Argentina, Brasil, Chile, Colômbia e Peru, publicaram Atlas Nacionais, incorporando dados piranométricos e heliográficos¹ (ver Anexo “Atlas Nacionais de Radiação Solar” - Atlas 1), porém com enorme limitação nas medições. Como consequência, o mapeamento da radiação solar na América do Sul possui baixa resolução espacial e temporal. Neste século, diversas redes parecem ter promissora continuidade, uma densidade considerável de estações, uma frequência pelo menos horária de informação da irradiância e acesso via internet (e.g. em países como o Brasil e Chile). Não necessariamente em ritmo operacional, outras redes fornecem acesso aos dados na escala de minutos (e.g. SONDA no Brasil, SolRad-Net na Argentina e também no Brasil). No continente, existe um conjunto adicional de estações com dados potencialmente disponíveis para incluir em um banco de dados. Ou seja, a utilidade de um banco compartilhado para estudos e aplicações na América do Sul é evidente.

Desde a década de 1980, os satélites geoestacionários como os das séries GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) e Meteosat permitiram desenvolver modelos de estimativa de irradiância solar com crescente acurácia e resolução espacial, baseados em imagens do canal visível (VIS). Diversos modelos fornecem estimativas de irradiância, e.g. GSIP/NOAA (Pinker et al., 2003), CMSAF/SIS (Posselt et al., 2012) e BrasilSR (Pereira et al., 2017). Vários Atlas recentes de radiação solar possuem base em dados de satélite, e.g. no Brasil e Uruguai (ver Anexo “Atlas Nacionais de Radiação Solar” - Atlas 2). Além disso, Solargis (2019) oferece um Atlas mundial.

Deve-se observar que os Atlas costumam oferecer valores médios em intervalos longos, portanto seu valor e aplicações são essencialmente climáticos. Além de organizar os dados disponíveis, um banco de dados de medições de radiação solar diária, em conjunto com estimativas via satélite, apresenta uma dupla utilidade. Por um lado, na validação de modelos (para sua crítica e aperfeiçoamento); por exemplo, o Atlas Mundial fornecido pelo Solargis tem menos de 20 locais de validação na América do Sul (Solargis, 2019). Por outro lado, permite o monitoramento de redes de medição e a detecção de valores considerados atípicos (*i.e. outliers*), favorecendo a manutenção de qualidade da radiometria de superfície.

Este trabalho apresenta a arquitetura de software e as capacidades preliminares do SPDRAD3 – Sistema de Processamento de Dados de Radiação Solar. Esta versão representa uma atualização e aperfeiçoamento da versão

¹ Pela sua estrutura, os heliógrafos têm uma tradição de longa data e processamento simples para fornecer insolação (*heliofania* em espanhol, *sunshine duration* em inglês). A equação de Angstrom-Prescott é uma aproximação linear usual para descrever a relação com irradiação diária; porém, ela mesma deve ser ajustada por comparação com piranômetro e seu ajuste começa a ser aceitável na escala de um mês.

anterior (Macedo *et. al.*, 2014), incluindo a organização do software em camadas, a gravação, visualização interativa e análises estatísticas de séries temporais de irradiância média diária para um conjunto de locais escolhidos, além de tecnologias mais modernas para instalação e disponibilização da aplicação, *i.e.* utilização de *containers*. As irradiâncias correspondem a medições publicadas por diversas instituições e estimativas fornecidas pelo modelo com base em dados de satélite, o GL versão 1.2 (Ceballos *et al.*, 2004; Porfírio *et al.*, 2020). São descritos os dados básicos do banco de dados espacial, os aspectos tecnológicos mais relevantes da solução e as primeiras aplicações desenvolvidas, comentando perspectivas de compartilhamento pela comunidade de ciência e tecnologia da América do Sul.

1.1 Histórico de Desenvolvimento e Motivação

A primeira versão do SPDRAD foi elaborada e desenvolvida como um protótipo em 2010, utilizando-se de scripts MATLAB para processamento e comunicação com um SGBD (sigla para Sistema Gerenciador de Banco de Dados) PostgreSQL. Esse trabalho inicial aconteceu no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/INPE) (Macedo *et. al.*, 2010). Em 2014, uma segunda versão do sistema foi elaborada e desenvolvida, denominada SPDRAD - versão 2 (Macedo *et. al.*, 2014). Neste caso, houve uma evolução das tecnologias utilizadas, bem como a atualização do esquema do banco de dados. *i.e.* adaptação para receber ciclos diários de dados e uma nova interface de acesso. Do mesmo modo, o trabalho aconteceu no contexto PIBIC/INPE.

Considerando as dificuldades associadas a recursos humanos e a falta de pessoal, o curto período de tempo para execução de trabalhos em bolsas PIBIC e o vínculo relativamente breve entre bolsista e Instituição, o desenvolvimento da ferramenta foi interrompido. Porém, dada a importância desse tipo de aplicação, a Instituição está dedicando novos esforços no desenvolvimento deste sistema. Diferentemente da construção das versões preliminares, atualmente Tecnologistas efetivos de carreira integram a equipe de desenvolvimento dos componentes de software. Espera-se que, a partir deste vínculo mais forte entre equipe, Instituição e desenvolvimento computacional, o SPDRAD possa de fato tornar-se uma ferramenta concreta e acessível para toda a comunidade técnico-científica interessada.

A próxima seção apresenta a Metodologia do trabalho e detalhes do desenvolvimento computacional, destacando os aspectos tecnológicos mais relevantes da solução atualmente em construção e as primeiras aplicações desenvolvidas.

2. METODOLOGIA

Na sua organização atual, o SPDRAD3 é alimentado com dados de irradiância média diária. Uma lista única (arquivo de texto do tipo CSV) descreve locais de interesse com cinco informações: código de identificação; latitude; longitude; altitude; código para país ou rede do local. A base de dados do SPDRAD ingere planilhas de texto mensais, organizadas segundo uma matriz de N linhas (locais disponíveis) com 36 colunas (dados mensais). As colunas contêm os 5 dados de definição do local, além de mais 31 valores diários para o respectivo mês da planilha (Tab. 1). Dados ausentes ou incompatíveis são preenchidos com valores específicos, *e.g.* -999 ou 000. É o caso, por exemplo, dos últimos dias em meses como fevereiro ou novembro. Os valores diários incluem medidas estimadas pelo modelo GL 1.2 (base de dados de satélites) e também obtidas por estações de coleta *in-situ* (base de dados de superfície).

Tabela 1 - Exemplo de dados ingestados pelo sistema SPDRAD. Valores de irradiância média diária do mês de dezembro de 2019 estimados pelo modelo GL para a localização “31865”. Arquivo: GLG12_201912.csv.

Localização	Lat	Lon	Altitude	País/Rede	Dia 01	Dia 02	Dia 03	...	Dia 30	Dia 31
31865	-6,037	-38,467	502	19	303,4	308,5	313,6	...	103,6	138,6

2.1 Base de Dados de Satélites

O modelo GL 1.2 (Ceballos *et al.*, 2004) roda operacionalmente no CPTEC/INPE, processando imagens do canal VIS de satélites GOES (em diferentes instantes de tempo) e gerando matrizes de irradiância solar, com um total de 1800 x 1800 pixels e resolução espacial de 0,04° (grade regular) (Fig. 1a). A lista de locais de interesse define atualmente 1678 pontos sobre América do Sul e Central, Oceano Atlântico, África e parte da Europa. Nestes dois últimos casos, está prevista a operação do modelo GL com imagens Meteosat (Porfírio, 2017). A cada mês é disponibilizada uma planilha com a matriz de estimativas diárias de irradiância². Os valores de irradiância solar são então obtidos a partir de uma operação de amostragem por pixel, ou seja, a coordenada geográfica de cada localização de interesse é remapeada para a grade regular produzida pelo modelo GL, em seguida o valor do pixel correspondente é extraído, para cada matriz disponível, dando origem a uma série temporal (Fig. 1b).

² A planilha mensal de dados GL pode ter ausência de dados ou com limitações de integração diária. Algumas destas limitações são descritas (Ceballos, 2022). Obviamente, uma ampliação da lista de locais de interesse implica em reprocessar os arquivos digitais originais e completar planilhas de dados; enquanto isso, os novos locais inseridos geram “dados ausentes” -999 na série precedente de planilhas.

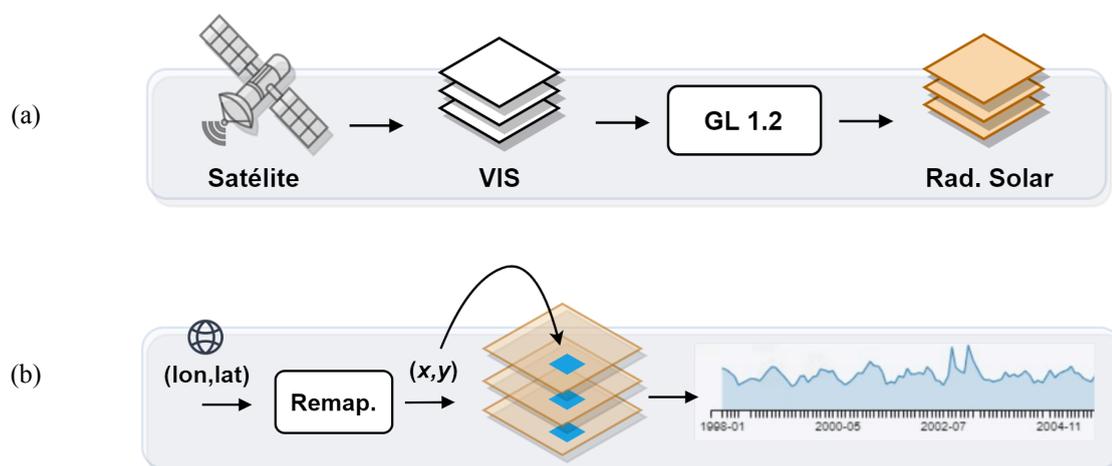


Figura 1 - (a) O modelo GL 1.2 processa imagens do canal VIS, em diferentes instantes de tempo, produzindo estimativas de radiação solar; (b) para cada localização de interesse, os valores são obtidos por amostragem, *i.e.* a coordenada geográfica é remapeada para a grade regular e o valor do pixel correspondente é extraído, para cada matriz disponível, dando origem a uma série temporal.

2.2 Base de Dados de Superfície

Planilhas de valores de irradiância média diária, obtidas por estações de coleta *in-situ*, com a mesma estrutura da base de dados de satélites são também ingeridas pelo SPDRAD. São exemplos de fontes de dados disponíveis:

- INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Agrometeorología, Chile, <https://agrometeorologia.cl/>.
- INMET - Dados Históricos Anuais. Instituto Nacional de Meteorologia, Brasil, <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos/>.
- SolRad-Net - Rede de piranômetros da NASA, Argentina e Brasil, <https://solrad-net.gsfc.nasa.gov/>.
- SONDA - Sistema de Organização de Dados Ambientais, INPE, Brasil, <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/>.
- EEAOC - Estación Experimental Agroindustrial “Obispo Colombres”, Sección Agrometeorología. Tucumán, Argentina, <https://agromet.eeaoc.gob.ar/>.

Importante ressaltar que a alimentação do banco de dados é progressiva. Até agosto de 2023, nem todas as fontes haviam sido incluídas na base de dados e elas não necessariamente compreendem o período com dados de satélites. Adicionalmente, dados de outras fontes podem e vêm sendo incorporados ao conjunto de informações ao longo do tempo. As informações completas sobre as fontes de dados de superfície, as instituições responsáveis, bem como as características específicas da instrumentação utilizada para realização das medidas estará disponível no sistema SPDRAD, a partir de um link para um relatório técnico que será produzido pelo Grupo de Radiação Solar, Terrestre e Atmosférica do INPE.

3. RESULTADOS

Esta seção apresenta os aspectos tecnológicos mais relevantes do SPDRAD3, desenvolvido para o processamento, armazenamento, análise, exploração e visualização de dados de radiação solar. A solução integra tecnologias de banco de dados espaciais, como o PostGIS, processamentos utilizando a linguagem de programação Python, uma aplicação mapa *web-based* e uma API para acesso aos dados. A arquitetura completa do sistema (Fig. 2) destaca os elementos principais e o fluxo de relações. O SPDRAD3 é projetado com uma arquitetura em camadas, composta pelos seguintes componentes:

- **Banco de Dados com extensão espacial:** o SGBD PostgreSQL é utilizado como o banco de dados principal do SPDRAD. Em conjunto com a extensão espacial PostGIS, essa tecnologia fornece recursos avançados para armazenamento e consulta de dados geoespaciais. No contexto deste trabalho, as informações são as localizações geográficas específicas e as séries temporais de medidas de radiação solar, com valores diários, incluindo dados medidos por estações de coleta *in-situ* e valores estimados pelo modelo GL a partir de imagens de satélites;
- **Módulo de Processamento:** componente de software para coleta, processamento e ingestão dos dados, além de outras funcionalidades relacionadas a manipulação das informações de radiação solar, *e.g.* tratamento e verificação dos valores e arquivos, decodificação de formatos, automatização de tarefas, execução de análises estatísticas, dentre outras;

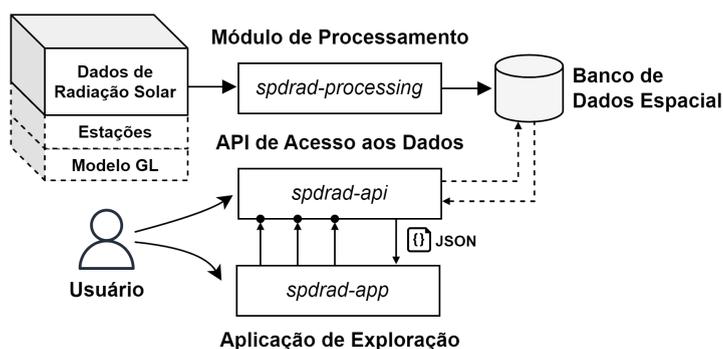


Figura 2 - Representação esquemática da arquitetura de software do SPDRAD3.

- **API de Acesso aos Dados:** a API (do inglês, *Application Programming Interface*) do SPDRAD é um conjunto de *endpoints* que fornecem acesso programático aos dados de radiação solar armazenados no banco de dados. Esse componente permite que desenvolvedores externos possam integrar os dados do SPDRAD em suas próprias aplicações ou que realizem consultas programáticas as informações de modo eficiente. A API é construída seguindo os princípios RESTful, utilizando protocolos HTTP e formatos de dados comuns, como JSON. Por exemplo, a partir da utilização da API, os usuários-desenvolvedores podem obter dados específicos de radiação solar para uma determinada região geográfica, realizar análises personalizadas ou extrair as informações básicas para uso em outras aplicações. Além disso, esse módulo também é utilizado na construção da própria aplicação de exploração fornecida pelo SPDRAD aos usuários finais;
- **Aplicação de Exploração:** última camada da arquitetura do software, trata-se de uma interface interativa que permite ao usuário final acessar e visualizar os dados de radiação solar de modo rápido e eficiente, interagindo com mapas e gráficos estatísticos; *i.e.* os usuários podem navegar por diferentes regiões geográficas, aplicar filtros, realizar a aquisição de arquivos com os valores, dentre outras opções. Em resumo, os recursos da aplicação *web-based* são desenvolvidos em conjunto com os dados armazenados no banco de dados espacial e a API, permitindo uma experiência interativa e visualmente atraente. A aplicação possui uma interface gráfica (Fig. 3), acessível por um navegador de Internet, bastante semelhante às aplicações de mapas populares, como por exemplo o Google Maps.

Desse modo, a arquitetura modular do SPDRAD3 divide o sistema em componentes independentes e interconectados. Cada componente tem uma função específica e é responsável por uma parte bem definida na solução, facilitando a manutenção e evolução do software em diversos aspectos, incluindo: escalabilidade, reutilização de código e depuração simplificada. O banco de dados construído possui informações para um período de 21 anos, mais especificamente, com data inicial em 01/01/1998 e data final em 31/12/2019. No total, são 1678 localizações geográficas de interesse. Para cada localização, existem valores diários de radiação solar, estimados pelo modelo GL e também medido *in-situ* pelas estações de coleta de dados. Eventualmente, pode haver ausência de dados para determinado período.



Figura 3 - Interface gráfica da Aplicação de Exploração. Os pontos em laranja representam as localizações geográficas de interesse incluídas no banco de dados.

Na Fig. 3, é mostrada a interface gráfica da Aplicação de Exploração dos dados. Os pontos em laranja representam as localizações geográficas incluídas no banco. Destacam-se também as ferramentas disponíveis, representadas pelos botões na cor branca associados com um ícone ilustrativo. Para cada localização, é possível obter os valores de radiação solar a partir de um clique na feição geográfica. O resultado é recuperado e exibido em um painel, contendo um gráfico estatístico com os valores e o período temporal das medidas (Fig. 4).

3.1 Comparação Superfície vs. Modelo GL

Considere, por exemplo, a recuperação e visualização dos dados para a localização com identificador “29967”, situada na cidade de Brasília - DF, Brasil (Fig. 4). O *pop-up* exibe informações sobre essa localização, incluindo também a altitude e a rede responsável pela estação (e.g. SONDA). Os valores de radiação são mostrados em um gráfico do tipo série temporal. Os valores em laranja representam as medidas realizadas pela estação de coleta *in-situ* e os valores em azul são os que foram estimados pelo modelo GL. Especificamente, neste caso, é possível observar uma boa aproximação dos valores no período entre 12/2004 e 08/2013. Neste painel, os usuários podem realizar o download dos dados no formato CSV, além de poder efetuar uma verificação estatística mais detalhada dos valores. A curva contínua representa o mesmo gráfico, porém, funciona como um controle interativo para exploração temporal das informações; *i.e.* o usuário pode interagir com esse gráfico e definir limites de datas e aplicar operação de zoom em períodos específicos.

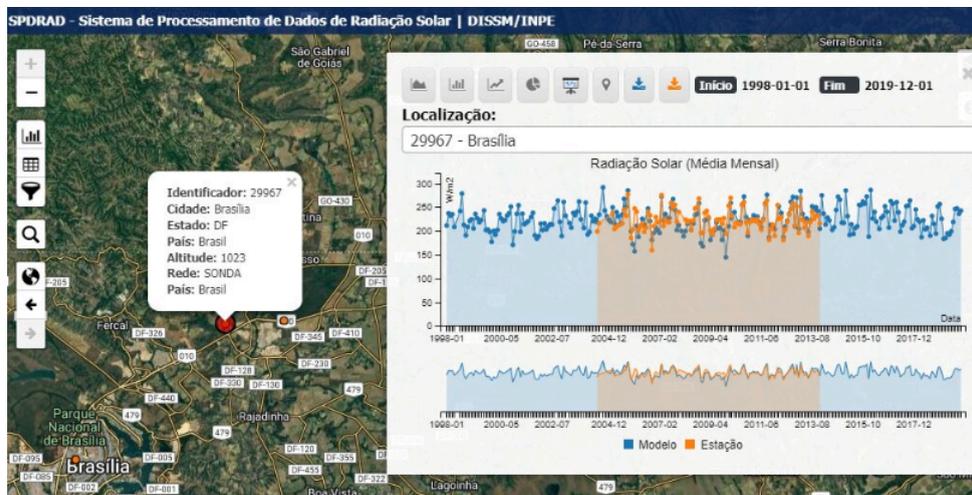


Figura 4 - Exemplo de recuperação e visualização dos dados para a localização “29967”, situada em Brasília - DF, Brasil. O resultado é exibido em um painel com um gráfico do tipo série temporal.

Desse modo, a arquitetura modular do SPDRAD3 divide o sistema em componentes independentes e interconectados. Cada componente tem uma função específica e é responsável por uma parte bem definida na solução, facilitando a manutenção e evolução do software em diversos aspectos, incluindo: escalabilidade, reutilização de código e depuração simplificada. O banco de dados construído possui informações para um período de 21 anos, mais especificamente, com data inicial em 01/01/1998 e data final em 31/12/2019. No total, são 1678 localizações geográficas de interesse. Para cada localização, existem valores diários de radiação solar, estimados pelo modelo GL e também medido *in-situ* pelas estações de coleta de dados. Eventualmente, pode haver ausência de dados para determinado período.

Considerando a capacidade de análise e visualização espacial de resultados fornecidos pelo SPDRAD, cada localização de interesse foi classificada de acordo com o valor R^2 (coeficiente de determinação), obtido a partir da regressão linear (Fig. 6). Neste caso, quanto maior o valor de R^2 , mais próximos são os valores de irradiância medidos pelas estações e os estimados pelo modelo GL. No mapa, as estações com $R^2 \geq 0,8$ estão destacadas com a cor verde, o que pode indicar estações de coleta em boas condições (e.g. cuidados com a verificação do equipamento, manutenção e calibração). Destaca-se aqui a região Sul do Brasil, com predominância de pontos de cor verde. Por outro lado, valores baixos de R^2 podem indicar estações que apresentaram, em algum período, problemas no processo de realização das medidas. No mapa, as estações com $R^2 < 0,5$ são exibidas com a cor vermelha. Destaca-se neste caso o estado do Ceará, na região Nordeste do Brasil, com uma densidade alta de pontos vermelhos. Do mesmo modo, temos também os estados de Rondônia e Tocantins, ambos na região Norte.

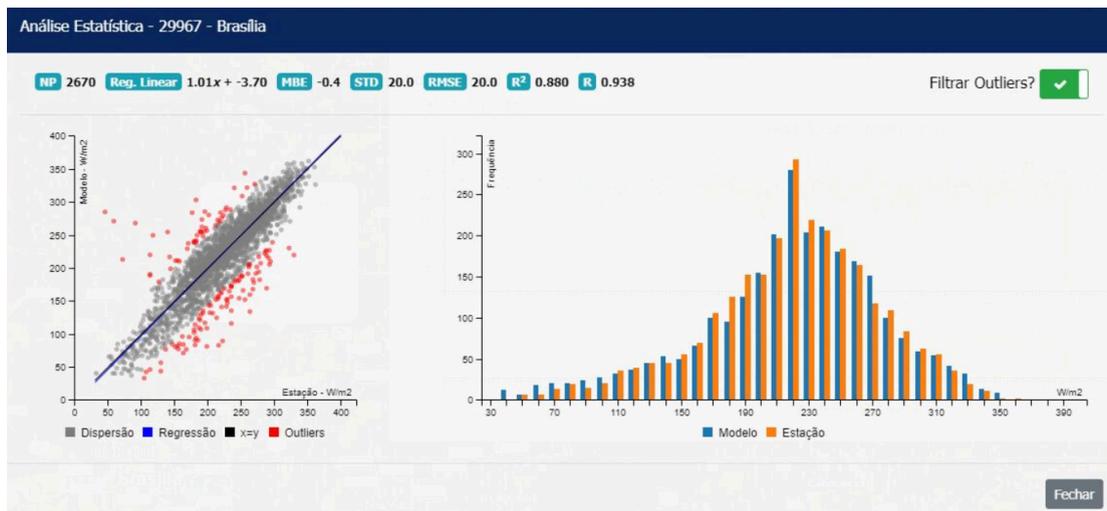
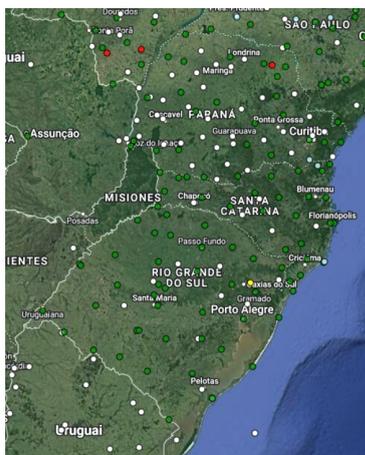


Figura 5 - Exemplo de análise estatística detalhada para a localização “29967”. Gráfico de dispersão em conjunto com as métricas calculadas, filtragem de outliers e histograma dos conjuntos de dados.



(a)



(b)



(c)

Figura 6 - (a) Classificação das estações de acordo com o valor R^2 , calculado a partir da regressão linear entre os valores medidos pelas estações e estimados pelo modelo GL. (b) Destaque para a região Sul do Brasil, com predominância de pontos de cor verde ($R^2 \geq 0,8$) e (c) estado do Ceará, Brasil, com densidade alta de pontos vermelhos ($R^2 < 0,5$).

Os pontos mostrados com a cor branca (*i.e.* sem dados) não tiveram o valor R^2 calculado pois não possuem valores medidos; *i.e.* para algumas localidades, os valores coletados *in situ* por estações em superfície estão ausentes. No caso das medidas estimadas, os valores existem nos campos estimados pelo GL, reforçando a importância dos modelos com base em dados de satélites devido à ampla cobertura geográfica que oferecem. O processo de incorporar séries temporais de medidas de superfície é contínuo e espera-se a colaboração da comunidade técnico-científica fornecendo dados para preencher essas lacunas.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o SPDRAD3, uma solução computacional para processar, armazenar, analisar e visualizar dados de radiação solar. Esses dados são obtidos por estações de coleta *in-situ* e também estimados por modelos a partir de imagens do satélite geoestacionário GOES, no caso, o modelo GL. O banco de dados construído possui informações para um período de 21 anos, com data inicial em 01/01/1998 e data final em 31/12/2019, considerando 1678 localizações geográficas de interesse.

Com uma arquitetura modular composta por componentes interconectados, incluindo um banco de dados com suporte espacial, um módulo de processamento, uma Aplicação de Exploração e uma API de acesso aos dados, o SPDRAD3 oferece uma abordagem eficiente e flexível para lidar com essas informações. A motivação é contribuir para os avanços na pesquisa e aplicação de energias renováveis, auxiliar nos estudos de validação de modelos e a na análise da qualidade das estações, além de tornar público e permitir o acesso eficiente desses dados para toda a sociedade.

Na Aplicação de Exploração, os usuários finais podem, de modo interativo, recuperar e analisar os dados de radiação solar para as localizações geográficas de interesse. Os valores são mostrados em um gráfico do tipo série temporal, com a capacidade da realização de análises estatísticas das distribuições e cálculo de métricas para avaliação do ajuste entre os valores medidos e os estimados.

Como trabalho futuro, pretende-se incluir na arquitetura do SPDRAD3 o serviço *web* denominado WTSS (sigla para *Web Time Series Service*), desenvolvido pelo INPE. Em resumo, WTSS (Vinhas et al., 2017) é um serviço para lidar com dados de séries temporais de imagens de sensoriamento remoto. Considerando uma localização geográfica e um intervalo de tempo, é possível recuperar a série temporal correspondente, consultando uma matriz 3D de imagens. Desse modo, será possível expor na API de acesso a dados todo o histórico das estimativas produzidas pelo modelo GL, com resolução geográfica de 0,04° (aproximadamente 4 km), considerando a totalidade espacial do território coberto pelas imagens produzidas. Ou seja, cada pixel, de todos os campos de valores do acervo histórico, poderá ser consultado em tempo de requisição.

O SPDRAD3, apresentado neste artigo, é uma versão preliminar, disponível atualmente apenas no âmbito do INPE. No entanto, é importante ressaltar que o sistema está planejado para ser lançado publicamente como uma solução de código aberto, livre, permitindo amplo acesso e uso por parte de pesquisadores, profissionais da indústria e demais interessados. Espera-se disponibilizar a “Aplicação de Exploração” para o público-geral até junho de 2024. Além disso, os códigos-fonte dos componentes de software desenvolvidos serão disponibilizados integralmente seguindo uma licença livre e de código aberto.

Agradecimentos

O trabalho contou com recursos parciais do projeto BIG - Base de Informações Georeferenciadas do INPE, 01.22.0504.00 - 1527/22, com financiamento do FNDCT - Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, gerido pela FINEP/MCTI - Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

REFERÊNCIAS

- Ceballos, J. C. Série temporal de valores pentadais do modelo GL 1.2 - Radiação Global. Relatório Técnico. Disponível em: <http://pururuca.cptec.inpe.br/gstar/DADOS/Nota0012022Pentadas.pdf>.
- Ceballos, J. C., Bottino, M. J. y Souza, J.M. (2004). A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. *J. Geophys. Research* 109: D02211, <https://doi.org/10.1029/2003JD003531>.
- Macedo, L. O.; Alonso, T. F. F.; Ceballos, J. C. Sistema de processamento de dados de radiação solar (SPDRAD) - Versão 2. XVIII Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET18), Recife, PE. 2014. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34P/3HHB835>.
- Macedo, L. O.; Ceballos, J. C. Sistema de Processamento de Dados de Radiação Solar (SPDRAD). Anais XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET16), 2010. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP7W/3826NUH>.
- Pereira, E.B., F.R. Martins, A.R. Gonçalves, R.S. Costa, J.F.L. Lima, et al. (2017) Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª edição, INPE, 88p. ISBN 978-85-17-00090-4. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.
- Pinker, R. T. et al. (2003). Surface radiation budgets in support of the GEWEX ContinentalScale International Project (GCIP) and the GEWEX Americas Prediction Project (GAPP), including the North American Land Data

- Assimilation System (NLDAS) project. Journal of Geophysical Research, v. 108 (D22), 8844, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2002JD003301>.
- Porfírio, A.C.S. (2017). Uma contribuição à modelagem de aerossol e componentes da radiação solar no modelo GL. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos – SP. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34P/3Q4PAHH>.
- Porfírio, A.C.S., J.C. Ceballos, J.M.S., Britto, S.M.S. Costa (2020). Evaluation of global solar irradiance estimates from GL1.2 satellite-based model over Brazil using an extended radiometric network. Remote Sensing v. 12, 1331; Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12081331>.
- Posselt, R. et al. (2012). Remote sensing of solar surface radiation for climate monitoring - The CM-SAF retrieval in international comparison. Remote Sensing of Environment, v.118, p. 186–198. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.016>.
- Solargis. Global Solar Atlas 2.0 - Validation Report. World Bank Group, ESMAP. (2019). Acesso: https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/doc/Validation-Report_Global-Solar-Atlas-2.0_WB-ESMAP_Nov2019-1.pdf.
- Vinhas, L.; Queiroz, G. R.; Ferreira, K. R.; Câmara, G. Web Services for Big Earth Observation Data. Revista Brasileira de Cartografia, v. 69, n. 5, 18 maio de 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv69n5-44004>.

ANEXO - ATLAS NACIONAIS DE RADIAÇÃO SOLAR

● Atlas 1

- [Atlas de Energía Solar de la República Argentina](#). Gallegos, H. Grossi, R. Righini, [GERSOLAR](#), Universidad Nacional de Luján;
- [Atlas Solarimétrico do Brasil](#): Banco de Dados Solarimétricos. Coord.: C. Tiba, Universidade Federal de Pernambuco;
- [Atlas de Energía Solar de Colombia](#). Ministerio de Minas y Energía. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME);
- [Atlas de Energía Solar del Perú](#). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú;
- [Mapa Solar del Uruguay](#) versão 1. Laboratorio de Energía Solar, Universidad de la República, Uruguay.

● Atlas 2

- [Atlas Brasileiro de Energia Solar](#) versão 2. Coord.: E.B. Pereira et al. Sistema de Organização de Dados Ambientais, INPE, Brasil;
- [Mapa Solar del Uruguay](#) versão 2. Laboratorio de Energía Solar, Universidad de la República, Uruguay.

SPDRAD3 - COMPUTATIONAL SOLUTION FOR EXPLORATION AND SPATIAL ANALYSIS OF SOLAR RADIATION DATA

Abstract. *This work presents SPDRAD3 - Solar Radiation Data Processing System, a computational solution developed to collect, process, analyze, and visualize solar radiation data. These data are obtained from in-situ stations and also estimated by models using remote sensing imagery. Specifically, the physical model used is the GL model, developed by CPTEC/INPE, which utilizes visible channel imagery from the GOES series satellites in order to produce estimates of surface-level global solar irradiance, with a focus on South America and adjacent oceans. The software architecture is modular, composed of interconnected components, including a geospatial database, a data access API, and an exploration application. The system is a robust and efficient solution for spatial analysis of solar radiation data, contributing to advancements in research and application of renewable energy, as well as enabling model validation and the analysis of in-situ station quality.*

Keywords: *Solar Radiation, Remote Sensing, Database.*