

Simulação de dados de irradiância: comparação de dados do sensor Ramses-ACC (TRIOS) com o simulador Espectro Solar (UFRGS)

Celso Israel Fornari¹
Pétala Bianchi Augusto-Silva¹
José Luiz Stech¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
celso@las.inpe.br
{petala, stech}@dsr.inpe.br

Abstract. The study of water quality by remote sensing involves the analysis of the interaction of electromagnetic radiation with the components of the water. The parameters used to classify water bodies as their response to radiant energy in their majority are normalized by the amount of radiant energy available at that moment for the processes to occur in the system. Thus, studies of aquatic systems rely on platforms to collect data about the downward irradiance. The acquisition of sensors to measure this is quite expensive, so simulators have been developed and applied to replace these sensors in field. This study aimed to test the efficiency of a simulator for downward irradiance data and concluded that it had a good performance to simulate field data with a irradiance difference of 0.13% of the measured value. Also, if previous data collected by a sensor at the study area is available, it can be created a calibration curve for this location. This calibration curve increase the difference between the simulated and the measured value of the irradiance (0.16%), however, the spectral profile was greatly adjusted for the measured data.

Palavras-chave: remote sensing, downwellin irradiance, simulation, sensoriamento remoto, irradiância descendente, simulação.

1. Introdução

O estudo da qualidade da água por sensoriamento remoto envolve a análise da interação da radiação eletromagnética com os componentes da água. Diversos são os parâmetros utilizados para classificar corpos d'água quanto a sua resposta à energia radiante, três de grande importância são: a reflectância irradiância; a reflectância de sensoriamento remoto (R_{sr}); e o coeficiente de atenuação difusa (K_d).

A reflectância irradiância é definida por Mobley (1994) e Kirk (1994) como a razão entre a irradiância emergente pela irradiância descendente. A reflectância de sensoriamento remoto é definida por Mobley (1994) como a razão da radiância emergente pela irradiância descendente medidas logo acima da superfície. O coeficiente de atenuação difusa é parâmetro que define o decaimento exponencial da irradiância descendente. Kirk (1994) sugeriu que o K_d é o melhor parâmetro para caracterizar um corpo d'água com relação à disponibilidade de energia radiante fotossinteticamente útil.

Como se pode notar, todos esses parâmetros são dependentes da irradiância descendente. Para entender o que é a irradiância descendente é necessário saber que a irradiância extraterrestre é toda a radiação eletromagnética emitida pelo Sol que atinge a Terra, no topo da atmosfera (Würfel, 2005). Esta, ao penetrar a atmosfera terrestre, pode interagir com as partículas constituintes até chegar à superfície terrestre. Toda a radiação que atravessa a atmosfera, sem sofrer espalhamento, e atinge a superfície terrestre é chamada de radiação direta. A radiação que atinge a superfície após ter sido refletida é chamada de radiação difusa e a radiação global é a soma destas duas contribuições, direta e difusa (Tiba et al., 2000); também conhecida como irradiância descendente.

O conhecimento da irradiância descendente é necessário para estudos de sistemas aquáticos para saber o quanto da energia está disponível para que os processos de interação da luz com o sistema aquático ocorram. Assim, estudos de sistemas aquáticos dependem de

plataformas de coleta de dados da irradiância descendente, não só de seu valor absoluto, mas de seu perfil de distribuição espectral.

A aquisição de sensores para essa medida é bastante onerosa, para sanar essa dificuldade simuladores podem ser aplicados em substituição a esses sensores. Estes simuladores se baseiam no conhecimento de que, ao penetrar a atmosfera, as ondas eletromagnéticas sofrem influência das moléculas e partículas em seu caminho médio, podendo ser absorvidas ou espalhadas, e ainda no topo da atmosfera cerca de 30 % da radiação solar total incidente no planeta Terra é refletida de volta para o espaço (Veissid et al., 2010).

Este trabalho visou testar a aplicabilidade de um simulador de dados de irradiância descendente para estudos em sistemas aquáticos de modo a contribuir com a diminuição do custo de aquisição de sensores para trabalhos de campo.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A área de estudo escolhida para este trabalho é o reservatório de Funil, localizado no médio curso do Rio Paraíba do Sul, no município de Resende, Estado do Rio de Janeiro (Figura 1).

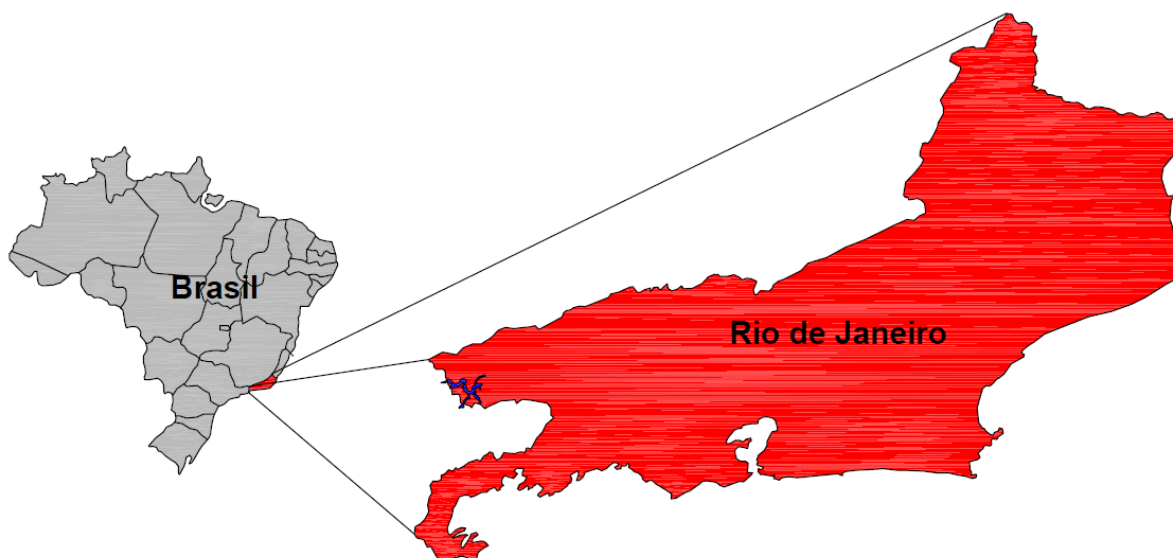


Figura 1: Localização do reservatório de Funil.

2.2 Campanhas de Campo

A primeira campanha de campo foi realizada nos dias 21 e 22 de maio de 2012. O dia 21 estava com o céu totalmente sem nuvens, já o dia 22 apresentou uma nebulosidade ínfima, pouco perceptível a olho nu, portanto aumentando um pouco a refletividade atmosférica. Um segundo campo foi realizado em dois de setembro do mesmo ano, quando o céu estava totalmente sem nuvens. A Tabela 1 mostra os pontos do primeiro campo e as condições utilizadas na simulação.

Tabela 1 - Descrição e condições locais dos pontos de coleta.

Ponto	Latitude	Longitude	Data	Hora	Temperatura (°C)
1	-22,5328	-44,6791	21/05/2012	10:02	14,77
2	-22,5414	-44,6613	21/05/2012	11:26	15,52
3	-22,527	-44,6427	21/05/2012	12:15	16,90
4	-22,5115	-44,6312	21/05/2012	13:17	18,53
5	-22,5151	-44,6219	21/05/2012	13:33	20,29
6	-22,5265	-44,6261	21/05/2012	13:55	20,29
7	-22,544	-44,5822	22/05/2012	13:29	19,54
8	-22,5292	-44,5583	22/05/2012	13:18	19,91

2.3 O sensor Ramses –ACC

O espectralímetro RAMSES-ACC da TRIOS foi utilizado para as medidas radiométricas nos pontos amostrais. Este equipamento opera da faixa do ultra-violeta até o infravermelho próximo do espectro eletromagnético (320 a 950 nm). Com ele foram gerados perfis espectrais da radiação eletromagnética na superfície.

2.4 Aplicativo

Para a execução deste trabalho foi utilizado o software Espectro Solar (Krezingler, 2004), versão 1.1, disponível em <http://www.solar.ufrgs.br/>. O software Espectro Solar simula o espectro solar incidente na superfície terrestre (ou seja, a irradiância descendente), em função de variáveis de entrada: temperatura ambiente, umidade relativa, latitude e longitude local, altitude, hora, data, e etc. O software é capaz de simular espectros global, direto, difuso e extraterrestre.

A faixa espectral simulada é de 200 a 4000 nm. Para este trabalho utilizamos simulações do espectro global para a faixa de 320 a 950 nm, que compreende parte do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Esta faixa espectral foi selecionada, pois coincide com a faixa de operação do sensor Ramses-ACC, utilizado em campo.

2.4 Simulação

Os espectros foram gerados de acordo com os dados meteorológicos, geográficos, data e hora do dia em que foi realizado o trabalho de campo. O valor da umidade relativa foi mantido constante para todos os espectros simulados, pois os dados meteorológicos disponíveis foram coletados na superfície do reservatório, o que pode acarretar em erros de medidas, não sendo recomendável a sua utilização por agências competentes (WMO, 2008).

Para um ajuste fino do espectro simulado, foi utilizado como padrão de comparação a irradiância global incidente na região. Com isto ajustou-se o fator de refletância da superfície e o fator de espalhamento da atmosfera até obter-se um valor simulado próximo ao valor de irradiância medido. Na ausência de dados de radiação, pode-se utilizar os dados da região de estudo disponíveis no atlas solarimétrico (Tiba et al., 2000).

A primeira análise realizada foi a comparação da integral entre o espectro medido e o simulado, isto é, a irradiância do intervalo espectral. A segunda análise foi a comparação da diferença entre o espectro simulado e o espectro medido em função do comprimento de onda.

A comparação em função do comprimento de onda permitiu analisar padrões de variação no espectro simulado, permitindo gerar uma curva de calibração a partir das diferenças entre os espectros simulados e medidos. Esta curva de calibração foi aplicada sobre todos os espectros simulados. Acredita-se que esta curva tenha caráter local, sendo necessária a sua validação para outras regiões ou mesmo a geração de curvas específicas para cada região.

3. Resultados e Discussão

O gráfico da Figura 2 (A) mostra o espectro medido e simulado para as condições locais do ponto 3. A irradiância medida pelo Ramses-ACC nesta faixa do espectro foi de 490,011 W/m². A irradiância simulada através do software Espectro Solar para a mesma faixa espectral foi de 490,404 W/m², representando uma diferença de 0,08 % em função do valor medido.

A curva de calibração do espectro simulado foi obtida através da diferença média de todos os espectros simulados. Aplicando-se a curva de calibração ao espectro simulado, obtém-se o espectro simulado corrigido. O espectro corrigido para o ponto 3 é representado na Figura 2 (B).

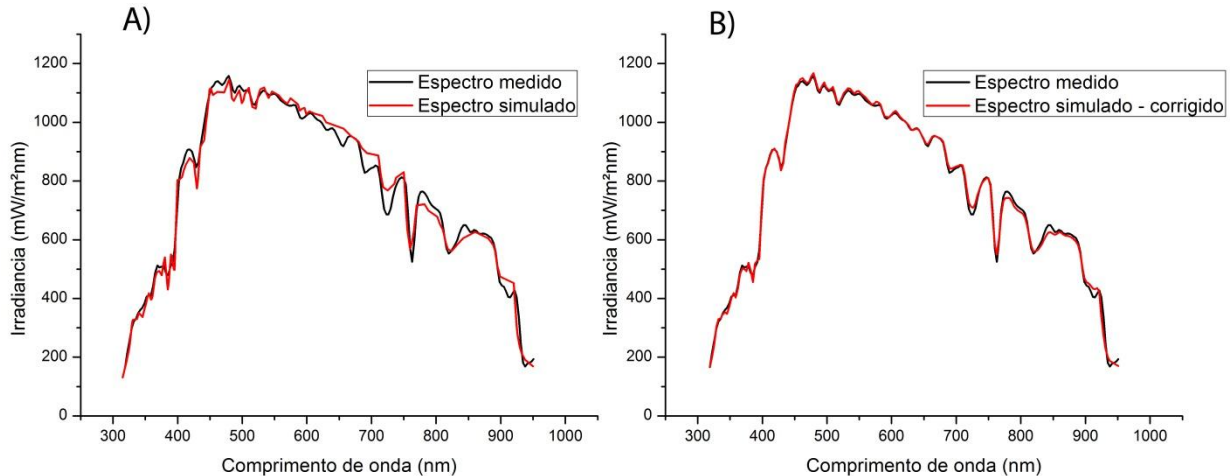


Figura 2 - Comparação do espectro medido com o espectro simulado. A – Sem correção. B - Corrigido.

A curva de calibração melhora significativamente o perfil do espectro simulado na faixa do ultravioleta ao visível. A irradiância simulada, após a aplicação da curva de calibração, passa a ser de 489,224 W/m², representando 0,16 % de diferença entre a medida e a simulada. A Figura 3 representa a diferença antes e depois da aplicação da curva de calibração.

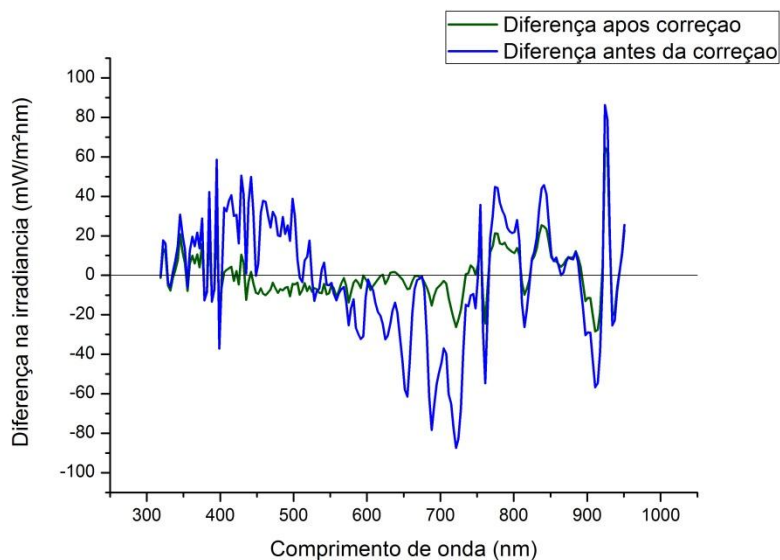


Figura 3 - Diferenças entre o espectro medido e os simulados.

A Figura 3 mostra uma melhora significativa na faixa de 320 a quase 700 nm, compreendendo a faixa do ultravioleta ao vermelho. O valor médio da diferença antes da correção é de $(-0,11 \pm 2,09)$ W/m² e após a aplicação da curva de calibração o valor médio da dispersão passa a ser de $(-0,28 \pm 0,80)$ W/m².

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos para todos os pontos estudados, antes e após a correção dos espectros.

Tabela 2 - Comparação dos valores de irradiância medidos e simulados.

Ponto	I _{medida} (W/m ²)	I _{simulada} (W/m ²)	Diferença I-I' (%)	I _{simulada} corrigida (W/m ²)	Diferença I-I' (%)
1	444,729	445,051	0,07	444,103	0,14
2	494,606	495,762	0,23	494,551	0,01
3	490,011	490,404	0,08	489,224	0,16
4	437,701	437,659	0,01	436,464	0,28
5	439,335	438,345	0,22	437,241	0,48
6	387,999	387,479	0,13	386,429	0,40
7	485,182	485,932	0,15	484,851	0,07
8	386,837	387,364	0,14	386,233	0,16

A diferença média entre a irradiância medida e a simulada é de $(0,13 \pm 0,06)$ %. Após a aplicação da curva de calibração, a diferença média passa a ser de $(0,16 \pm 0,13)$ %. Há um aumento na diferença de 0,03 % (de 0,13 para 0,16 %). Entretanto, ocorre uma diminuição da dispersão em torno do valor médio (passa de $\pm 2,09$ para $\pm 0,80$ W/m²). A aplicação da curva de calibração resulta na melhora do perfil do espectro simulado, mas passa a estimar a irradiância descendente total com uma incerteza maior.

A segunda parte deste trabalho consistiu em estimar o espectro incidente no mesmo local estudado, em um período do ano diferente, e compará-lo com o espectro medido no local, a fim de verificar sua aplicabilidade fornecendo somente os dados da condição local do dia. A tabela abaixo mostra os dados locais no dia em que foram realizadas as medidas do espectro solar em campo.

Tabela 3 - Descrição e condições locais dos pontos de coleta do segundo campo.

Ponto	Latitude	Longitude	Data	Hora	Temperatura (°C)
7	-22,544	-44,5822	02/09/2012	11:54	17,85
8	-22,5292	-44,5583	02/09/2012	10:54	15,42
9	-22,5265	-44,6261	02/09/2012	12:28	19,34

O ponto 8 é representado no gráfico da Figura 4. Este ponto foi simulado com as condições locais e após isto, aplicado à curva de calibração.

O *software* Espectro Solar mostrou um bom desempenho na simulação do espectro solar para a faixa de 320 a 950 nm. O resultado simulado fica ainda melhor quando é aplicada a curva de calibração local, obtida através de um campo de validação. Os resultados obtidos para o segundo campo são apresentados na Tabela 4.

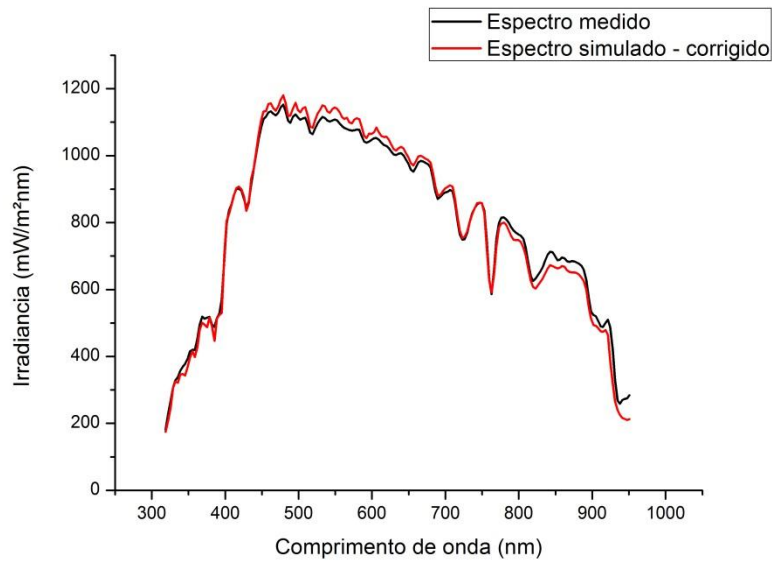


Figura 4 - Comparação do espectro medido e simulado do segundo campo para o ponto 8.

Tabela 4 - Comparação dos valores de irradiância medidos e simulados do segundo campo.

Ponto	I_{medida} (W/m ²)	I_{simulada} (W/m ²)	Diferença I-I' (%)	$I_{\text{simulada}}^{\text{corrigida}}$ (W/m ²)	Diferença I-I'' (%)
7	570,702	571,107	0,07	570,389	0,05
8	510,761	509,523	0,24	508,642	0,42
9	557,741	557,147	0,11	556,409	0,24

A diferença média entre a irradiância medida e a irradiância simulada é de $(0,11 \pm 0,06)$ %. Após a aplicação da curva de calibração a diferença média é de $(0,24 \pm 0,12)$ %. O que mostra um aumento tanto na média quanto na dispersão.

Os resultados simulados se mostram muito próximos dos resultados medidos no local. O *software* Espectro Solar mostrou bom desempenho para condições locais variadas com dias de céu limpo para duas datas distintas, maio e setembro do mesmo ano.

4. Conclusões

O *software* Espectro Solar mostrou bom desempenho para todos os espectros comparados neste trabalho. A diferença média entre a irradiância medida e simulada para o primeiro campo é de $(0,13 \pm 0,06)$ % e de $(0,11 \pm 0,06)$ % para o segundo campo. Após a aplicação da curva de calibração a diferença média passa a ser de $(0,16 \pm 0,13)$ % para o primeiro campo e de $(0,24 \pm 0,12)$ % para o segundo campo.

Após a aplicação da curva de calibração, o perfil do espectro mostrou uma melhora quando comparado ao simulado sem correção. O valor médio antes da correção é de $(-0,11 \pm 2,09)$ W/m² e após a aplicação da curva de calibração o valor médio da dispersão passa a ser de $(-0,28 \pm 0,80)$ W/m², afastando um pouco a média do valor ideal, mas diminuindo a dispersão em torno do valor médio.

É possível simular o espectro solar incidente através das condições locais com boa precisão. Esta alternativa pode ser avaliada sempre que não houver disponibilidade de um espectroradiômetro para uso em campo.

Pelos resultados apresentados neste trabalho, demonstra-se que é possível também utilizar apenas as faixas espectrais de interesse para estudos específicos, melhorando ainda mais o resultado simulado pelo *software*.

Sugere-se ainda o teste da curva de calibração gerada para o reservatório de Funil em outra localidade, testando a aplicabilidade desta em outras regiões.

Referências Bibliográficas

Kirk, J. T. O. **Light & photosynthesis in aquatic ecosystems**. Melbourne: Cambridge University Press, 509 p., 1994.

Krezinger, A. **Software Espectro Solar**, v. 1.1, Porto Alegre, UFRGS, 2004. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/>> Acesso em: 05 set. 2012.

Mobley, C.D. **Light and water: radiative transfer in natural waters**. San Diego, Academic Press. 592 p., 1994.

Tiba, C.; Moszkowicz, M.; Cavalcant, E. S. C. **Atlas solarimétrico do Brasil**. Recife: Universitária da UFPE, 2000.

Veissid, N.; Escobedo, J. F.; Galdino, M. A. Atmospheric absorption ratio on the cities of Botucatu-SP and Rio de Janeiro-RJ. **Revista brasileira de meteorologia**. v. 25, n. 4, p. 455-468, 2010

World Meteorological Organization, **WMO guide to meteorological instruments and methods of observation**, Geneva, 2008

Würfel, P. **Physics of solar cells: From basic principles to advanced concepts**. Berlin: Wiley-VCH. 256 p. 2009