

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Ciências Atmosféricas
Grupo de Micrometeorologia

**Estudo Observacional da
Radiação de Onda Longa Atmosférica
na cidade de São Paulo**

ALUNO: EDUARDO WILDE BÁRBARO

ORIENTADOR: PROF. DR. AMAURI PEREIRA DE OLIVEIRA

BOLSA PIBIC-CNPq N° 109589/2007-6

Vigência: 2007/2008

Relatório Parcial de atividades
Período: Agosto de 2007 a Fevereiro de 2008

Fevereiro de 2008

Resumo do projeto

Medidas de radiação de onda longa atmosférica (ROL) são realizadas na plataforma micrometeorológica do Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP) desde 1997. Assim, o presente projeto tem como objetivo analisar a consistência da série temporal de medidas de ROL, utilizando como referência as séries de temperatura, umidade relativa e radiação solar global (ROC), também medidas no IAG-USP. Além disso, aplicar a técnica de redes neurais visando corrigir a ROL utilizando como base para treinamento observações corrigidas pelo método proposto por Fairall et al., [7], com o intuito de comparar os valores encontrados com os dados de ROL do projeto *SRB-NASA (Surface Radiation Budget)*. O trabalho também pretende selecionar os dias de céu claro em São Paulo para os 9 anos de observações utilizados neste trabalho (1997 -2006) e determinar através dos índices estatísticos MBE (“Mean Bias Error”), RMSE (“Root Mean Square Error”) e do parâmetro d-Wilmott a performance de 10 modelos empíricos de estimativa de ROL para dias de céu claro.

Índice

Introdução	1
Plataforma micrometeorológica	2
O Pirgeômetro	2
A equação do pirgeômetro	3
Correção de Fairall	4
Redes neurais	5
Fluxo de radiação de onda longa atmosférica	7
O projeto SRB-NASA	7
Modelos empíricos	8
Metodologia	9
Instrumentação	9
Filtragem dos dados	10
Correção de Fairall & Redes Neurais	10
Dias de céu claro	11
Modelagem empírica	12
Programação em linguagem <i>FORTRAN</i>	14
Resultados	16
Remoção dos dados espúrios	16
Correção do efeito de emissão do domo utilizando Redes Neurais	18

Índice	iii
Performance da ROL	19
Dias de céu claro	20
Modelagem empírica	21
Estudo de caso	23
Conclusão	26
Dificuldades	28
Outras atividades	29
Perspectivas	30
A Aproximação dos dados de ROL por uma Gaussiana	31
Referências Bibliográficas	35

Introdução

A cidade de São Paulo, com aproximadamente 11 milhões de habitantes, juntamente com 39 outras cidades, formam a Região Metropolitana de São Paulo (*RMSP*), ocupada por 20,5 milhões de habitantes. Além disso, com mais de 7 milhões de veículos automotores, a cidade de São Paulo caracteriza-se por um grau moderado de contaminação por material particulado, [12]. Contudo, as emissões veiculares contribuem consideravelmente para o aumento dos valores de material particulado, ozônio e monóxido de carbono, tanto em escala local quanto regional, [22].

A *RMSP* possui aproximadamente 8051Km^2 , sendo a maior área urbana da América do Sul e uma das 10 maiores do mundo.



Figura 1: Imagem de Satélite (Landsat) da RMSP

Estudos anteriores indicam que a evolução diurna das radiações difusa, direta e global está correlacionada com a poluição do ar, principalmente material particulado, [15], [16], [17]. Para investigar o papel desempenhado por essa poluição, é crucial desenvolver modelos mais acurados de estimativa de ROL na cidade de São Paulo, bem como aprimorar as medidas de satélite, [4].

Este trabalho apresenta dois objetivos principais. O primeiro, é caracterizar a evolução sazonal de ROL na cidade de São Paulo usando as medidas disponíveis de ROL e outros parâmetros medidos na plataforma micrometeorológica do IAG-USP, [16]. O segundo, é avaliar a performance de 10 modelos empíricos disponíveis na literatura para reproduzir a ROL observada em dias de céu claro na cidade de São Paulo. Esse estudo será realizado com base nos 9 anos de observações contínuas da ROL na plataforma micrometeorológica do IAG-USP entre 1997 e 2006.

Plataforma micrometeorológica

A plataforma micrometeorológica está em operação contínua desde 26 de abril de 1994 e efetua medidas de radiação solar global e difusa, [18]. A partir de 1997, foram iniciadas também, observações contínuas de ROL, temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e precipitação, [19]. O objetivo dessas observações é determinar as características do microclima urbano da cidade de São Paulo e investigar a importância da poluição atmosférica.

O Pirgeômetro

O pirgeômetro é o instrumento utilizado para medir ROL. Ele é sensível a comprimentos de onda de 4 a $50\mu m$ cobrindo a parte do espectro eletromagnético esperado de emissão da atmosfera. É constituído por uma “termopilha” pintada de preto com uma junção em contato com a base de metal do instrumento e outra junção exposta à atmosfera. Esta, é coberta por um domo de silício, (material quase opaco à radiação solar de onda curta), coberto com uma camada de filtro que não transmite radiação com menos de $3\mu m$, [20]. Esse domo serve para proteger a junção da termopilha do aquecimento por radiação de onda curta; além disso, também isola a termopilha da transmissão direta de calor pelo ar, ou seja, condução e convecção. Todo o pirgeômetro (exceto o domo de silício) é protegido para que se minimize o aquecimento do instrumento devido à radiação solar.

A equação do pirgeômetro

O sinal de saída da termopilha é uma tensão ΔV proporcional à diferença de temperatura entre a junção exposta à ROL (que se aquece a uma temperatura T_s) e a junção em contato com a parte interna metálica do instrumento (que apresenta uma temperatura T_c). Esta diferença de temperatura tenta ser compensada por condução térmica através da termopilha, que transfere calor da parte interna metálica para compensar a perda radiativa provocada pelo aquecimento da junção exposta.

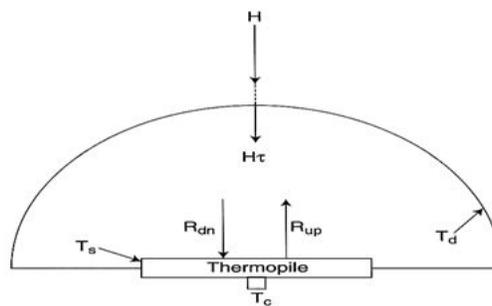


Figura 2: Diagrama do balanço de energia da termopilha e do domo do pirgeômetro

Onde:

H é a ROL ambiente;

τ é o coeficiente de transmissão do domo;

T_d é a temperatura do domo;

T_c é a temperatura do corpo do pirgeômetro;

T_s é a temperatura da junção exposta da termopilha;

R_{dn} e R_{up} são os componentes (incidente e emergente), da ROL.

Segundo [7], a equação do pirgeômetro é dada por:

$$H = \frac{\Delta V}{s_0} + \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_c^4 + B \cdot \sigma \cdot (T_c^4 - T_d^4) \quad (1)$$

Onde:

ΔV é a tensão de saída;

s_0 é o fator de sensibilidade;

ϵ_0 é a emissividade da junção exposta da termopilha;

B é a razão entre a absorção e transmissão.

A relação entre a diferença de temperatura das junções ΔT e a tensão de saída ΔV é:

$$\Delta T = \alpha \cdot \Delta V \quad (2)$$

Onde: α é constante e praticamente independente da temperatura $\alpha \approx 694K \cdot V^{-1}$, [6].

Correção de Fairall

A calibração de um pirgeômetro é realizada pelo laboratório que o construiu. Mede-se a tensão da termopilha ΔV_b e a temperatura da junção fria T_c quando o pirgeômetro atinge o equilíbrio térmico com uma fonte de calor controlada (um tanque de cobre cheio de água, assumido como um corpo negro) em duas temperaturas de corpo negro $T_b = 5^\circ C$ e $15^\circ C$. Neste procedimento de calibração, ϵ_0 é assumido como 1 e diferenças de temperatura entre o interior do domo e a parte interna do instrumento não são consideradas.

Assim, a medição da tensão de saída da termopilha multiplicada pelo fator de sensibilidade s_0 e a medição das temperaturas do domo e do interior do aparelho, fornecem imediatamente H .

A formulação de ROL corrigida por Fairall é apresentada a seguir:

$$ROL_F = ROL + 3,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(T_c + 273)^4 - (T_d + 273)^4] \quad (3)$$

Após a validação da expressão, Fairall, [7] determinou sua constante de sensibilidade s_F e comparando-a com a original s encontrou:

$$\frac{s}{s_F} = 1,043 \quad (4)$$

A constante de sensibilidade fundamental do pirgeômetro (após a correção de Fairall) é cerca de 4% maior do que a determinada pela Eppley Laboratory Inc.

Basicamente, a equação de Fairall corrige os efeitos de emissão do domo do pirgeômetro, ou seja, como a termopilha é sensível a ROL e o domo do pirgeômetro é preto, há interferência na medida de ROL pela emissão do domo. Este efeito é particularmente importante durante o dia com o aquecimento do domo causado pela radiação solar. Observa-se que a correção de Fairall leva isso em conta, quando na equação 3 se subtraem as temperaturas do corpo e domo. O fator 3,5 é empírico e foi ajustado com os dados utilizados para aferir a formulação.

Medições realizadas pela Eppley Inc. para a comprovação desta correção encontraram erros de aproximadamente 3,5% nesta nova formulação, enquanto que com equações mais simplificadas, que não consideram a diferença de temperatura entre o domo e o interior do instrumento, os erros chegam a 5% [20], [7].

Redes neurais

No caso de algum tipo de interrupção numa série de dados (desde que ela apresente padrões), pode-se aplicar a técnica de redes neurais (*RN*) para estimar os valores faltantes.

A abordagem (conceito), consiste em capturar os princípios básicos de informação do cérebro humano e aplicá-los na resolução de problemas que envolvam aprendizado a partir da experiência.

A criação do primeiro modelo de redes neurais deu-se em 1943 através de McCulloch e Pitts. Em 1958, Rosenblatt criou o *Perceptron*, que segundo ele, “conseguiu identificar todo e qualquer tipo de padrão possível de se representar”. O próprio Rosenblatt mostrou que as redes neurais poderiam ser treinadas para seguir padrões definidos. Ainda hoje o *Perceptron* é um dos modelos de rede neural mais utilizados. [11]

O modelo recebe quantas entradas forem inseridas e, assim como um neurônio, devolve uma única saída, que é o resultado da combinação de todas as entradas, ou seja, quanto maior a quantidade de entradas, mais próxima da realidade será a resposta.

As aplicações das RN são muitas:

Controle de variáveis não lineares (caos);

Reconhecimento de sinais de voz;

Monitoramento de estoques (predição).

Uma de suas principais aplicações atuais é o uso em previsão para parâmetros faltantes em uma *série temporal*.

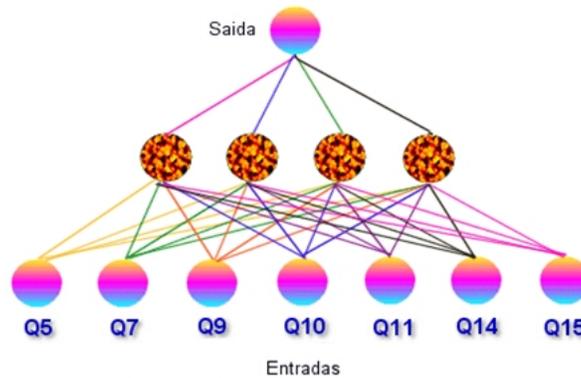


Figura 3: Esquema da RN

A figura 3 esquematiza como uma rede neural genérica funciona. Não há limite a quantidade de parâmetros de entrada, mas a saída será sempre única.

A técnica de RN, por funcionar através de padrões, necessita de um processo conhecido como *learning*, ou seja, deve ser fornecida a saída para o algoritmo a fim de treiná-lo a reconhecer os padrões do conjunto de dados e reproduzir o resultado. A quantidade de valores fornecidos deve ser tal que a precisão dos dados seja atingida, (critério de parada). Nas camadas intermediárias há um processo conhecido como retro-propagação (*back-propagation*) do sistema, visando minimizar o erro por meio de gradientes até o valor da saída já previamente fornecido.

Depois do *learning* ocorre um outro processo conhecido como *training*, que visa calibrar a RN com outros dados, obrigatoriamente diferentes dos utilizados no processo anterior. Este processo é útil para verificar a eficácia do *learning*. Deve ser fornecida a mesma quantidade de entradas do *learning*, mas não a saída. A RN deverá gerar os resultados, que devem ser comparados com os já conhecidos.

Fluxo de radiação de onda longa atmosférica

O balanço de energia à superfície determina a quantidade de fluxo de energia disponível para a evaporação da água e para a variação na temperatura da superfície. O balanço de radiação para a superfície é dado pela soma dos fluxos de ROC e ROL.

O fluxo descendente de ROL é um dos termos fundamentais no balanço de radiação em superfície e é primordial tanto em estudos climáticos quanto em outras aplicações, como a agrometeorologia (e.g. previsão de geada) e interação ar-mar-gelo, [14].

A radiação de onda longa da atmosfera é seguramente a componente do balanço de radiação mais difícil de ser medida. Uma das principais razões é o fato de que o pirgeômetro emite radiação em comprimentos de onda e intensidade comparáveis àqueles que devem ser medidas por ele, [13], havendo portanto, necessidade de correção.

O projeto SRB-NASA

Os dados da NASA são utilizados muitas vezes como validadores de modelos e experimentos. A NASA desenvolveu um projeto que visa estudar o balanço de radiação na superfície chamado SRB, (*Surface Radiation Budget*) sendo um componente da GEWEX (*Global Energy and Water cycle EXperiment*). O SRB estima o fluxo de radiação na superfície utilizando observações de satélite e re-análises meteorológicas. Basicamente, o SRB consiste em apresentar medidas de satélite dos fluxos de ROC e ROL. O objetivo do SRB é usar os dados suplementados com os dados de entrada do satélite usando algoritmos para estimar vários parâmetros da alta atmosfera e da superfície. A série de dados atual é arquivada para distribuição no Centro de Dados de Ciências Atmosféricas da NASA [10].

Atualmente existem dados de Julho de 1983 a Dezembro de 2004 fornecendo registros de fluxos e dos componentes da superfície e do topo da atmosfera. Os dados do SRB têm potencial para contribuir significativamente à melhor compreensão dos principais componentes do sistema climático: oceanos, superfície e atmosfera. [25]

Modelos empíricos

Medidas em superfície de ROL são muito trabalhosas, pois o custo do pirgeômetro é muito elevado e é necessária sua constante calibração.

Apesar da boa performance, modelos de transferência radiativa são difíceis de utilizar constantemente, pois necessitam para validação, informações detalhadas sobre o estado termodinâmico da atmosfera, sua estrutura e o conteúdo de aerossóis e gases, além de medidas de fluxos de radiação em diferentes níveis [20].

Desta forma, modelos empíricos podem ser úteis, pois utilizam somente temperatura de superfície e pressão de vapor do ar, [21], [14], [8]. Comparativamente, modelos empíricos são simples de aplicar, mas são relativamente limitados às condições às quais foram desenvolvidos, além de requererem uma série longa de dados de ROL, temperatura e pressão de vapor, para validação.

Estimativas de satélite, por exemplo, utilizam uma combinação de modelos de transferência radiativa, expressões empíricas e observações *in situ*.

Metodologia

Instrumentação

O pirgeômetro utilizado na plataforma micrometeorológica do IAG-USP está conectado ao sistema de aquisição de dados tipo datalogger 21X da *Campbell*, que realiza medições com uma taxa de amostragem de $0.2Hz$. Os dados são armazenados em valores médios de 5 minutos [17].



Figura 4: Pirgeômetro da Eppley modelo PIR

Utilizou-se para esta pesquisa o Precision Infrared Radiometer *PIR* da *Eppley Lab. Inc*, que possui as seguintes características:

Sensibilidade: $\approx 5\mu Wm^{-2}$;

Impedância: 700Ω ;

Linearidade $\pm 1\%$ de 0 a $700Wm^{-2}$;

Tempo de resposta: 2 segundos.

Os canais que medem as temperaturas do corpo e do domo do pirgeômetro, (T_c e T_d) tornaram-se disponíveis somente no ano de 2004. Antes, as medidas de ROL eram realizadas seguindo somente as recomendações do fabricante.

Mediu-se ROC utilizando um *piranômetro*, também da Eppley modelo 8 – 48.

Para as estimativas de temperatura e umidade relativa, usou-se um par de termistores e sensores capacitivos da Vaisalla, [18] e [19]. De acordo com o fabricante dos sensores de temperatura e umidade relativa, a acurácia é da ordem de $0,1^\circ\text{C}$ e 2% respectivamente para um intervalo de temperatura de $0\text{-}40^\circ\text{C}$ e umidade de 10-90%.

Filtragem dos dados

A remoção de problemas dos dados de ROL é muito mais complicada quando comparada a qualquer outra variável meteorológica. Existem períodos que o pirgeômetro não funciona bem devido a problemas na bateria ou ainda acumulação de chuva ou poeira em seu domo. Estas condições são mais difíceis de se identificar quando comparadas a simples incursões de sinal, pois o pirgeômetro não está totalmente desligado. Para atenuar estas condições mais complicadas, aplicou-se uma filtragem aos dados utilizando desvio-padrão¹.

Deve ser enfatizado que o conjunto final de dados contém apenas dias com 100% de observações, onde 100% inclui dias com *menos de* 4 valores faltantes (dados de 5 minutos).

Correção de Fairall & Redes Neurais

Como a temperatura do corpo e do domo do pirgeômetro somente foram implementadas em 2004, a ROL corrigida pela formulação de Fairall, equação 3, somente pôde ser calculada a partir de 2004. Os valores de ROL anteriores devem ser corrigidos de outra maneira, e para tanto utilizou-se a técnica de Redes Neurais (RN).

Neste trabalho, aplicou-se a técnica de RN para corrigir os dados do pirgeômetro sem correção de Fairall, (emissão do domo). O *learning* utilizado foi de 7 dias do ano de 2004 e 2 dias do ano de 2005, correspondendo a 2578 observações. Estes dias foram escolhidos

¹Ver Apêndice A

pelo método heurístico, utilizando padrões como seco, úmido, frio, quente, nublado e dias de céu claro. Baseado no estudo feito por [20], os parâmetros mais relevantes para a correção do efeito do domo no caso dos pirgeômetros PIR da Eppley são:

1. ROL observada
2. ROC
3. temperatura
4. umidade relativa

Como mostrado em estudos anteriores, [20], o algoritmo de *back-propagation* com *learning rate* de 0,3 e *momentum* de 0,5 produzem um resultado rápido e efetivo utilizando o *MultiLayer Perceptron*, *MLP*.

Realizou-se o teste da RN utilizando um conjunto de dados diferente do utilizado no *learning*.

É importante enfatizar que o MLP usado apresenta 3 camadas. A primeira possui 4 neurônios, a segunda 50 e a terceira 1.

Dias de céu claro

Observando-se a evolução diurna da radiação global e difusa em superfície, é possível identificar dias em que o céu não está significativamente coberto por nuvens, [5].

Os dias de céu claro foram estimados pela inspeção visual da evolução da radiação solar direta e difusa em superfície. Os dias foram selecionados quando as curvas de evolução diurna apresentaram comportamento suave durante o dia.

A radiação direta deve apresentar um ciclo diurno e a difusa ser sempre próxima de zero. Nos dias de céu claro, uma parte da radiação difusa é proveniente do material particulado da atmosfera, (poluição, aerossóis).

A figura 5 apresenta uma evolução temporal típica de um dia de céu claro. Este dia foi ainda utilizado no estudo de caso apresentado mais a frente.

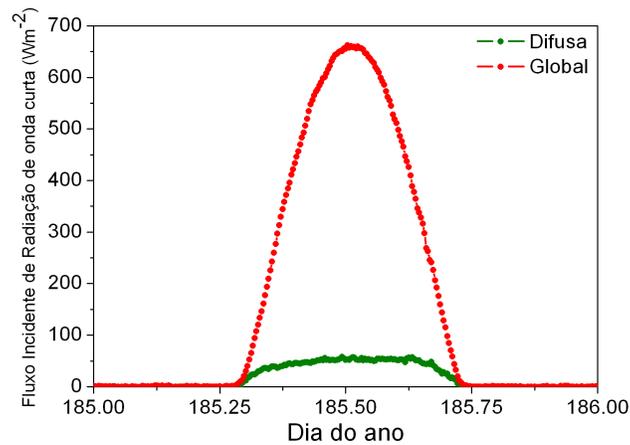


Figura 5: Dia de céu claro

Modelagem empírica

Grande parte dos modelos apresentados é baseado em relações empíricas derivadas de observações, sem que existam justificas teóricas para seu uso [14], [2], outros utilizam ainda aproximações da ETR (e.g. Brutsaert, [3]). A tabela a seguir apresenta as 10 expressões baseadas em [21] e [14] que serão utilizadas para estimar a ROL.

Tabela 1: Relações empíricas disponíveis na literatura para estimar ROL.

Ångström (1918)	$(0.83 - 0.18 \times 10^{-0.067 e_0}) \sigma T_0^4$
Brunt (1932)	$(0.52 + 0.065 \sqrt{e_0}) \sigma T_0^4$
Swinbank (1963)	$(9.2 \times 10^{-6} T_0^2) \sigma T_0^4$
Idso-Jackson (1969)	$\left[1 - 0.261 \exp(-7.77 \times 10^{-4} (273 - T_0)^2)\right] \sigma T_0^4$
Brutsaert (1975)	$1.24 \left(\frac{e_0}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}} \sigma T_0^4$
Satterlund (1979)	$1.08 \left[1 - \exp\left(-e_0^{\frac{r_0}{2016}}\right)\right] \sigma T_0^4$
Idso (1981)	$\left[0.7 + 5.95 \times 10^{-5} e_0 \exp\left(\frac{1500}{T_0}\right)\right] \sigma T_0^4$
Prata (1996)	$\left\{1 - \left(1 + 46.5 \left(\frac{e_0}{T_0}\right)\right) \exp\left[-\left(1.2 + 3 \left(46.5 \left(\frac{e_0}{T_0}\right)\right)\right)^{\frac{1}{2}}\right]\right\} \sigma T_0^4$
Dilley & O'Brien (1998)	$59.38 + 113.7 \left(\frac{T_0}{273.16}\right)^6 + 96.96 \sqrt{18.6 \left(\frac{e_0}{T_0}\right)}$
Niemelä (2001)	$[0.72 + 0.009(e_0 - 2)] \sigma T_0^4$

e_0, T_0 e σ são respectivamente pressão de vapor de água (hPa), temperatura do ar (°C) e constante de Stefan Boltzman ($5.67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$).

Para determinar a performance dos modelos empíricos de ROL atmosférica utilizaram-se os seguintes parâmetros estatísticos: *MBE* (“Mean Bias Error”), *RMSE* (“Root Mean Square Error”) e o índice da ajuste *d*, proposto por Willmott [24], calculados da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 MBE &= \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \\
 RMSE &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \\
 d &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)} \tag{5}
 \end{aligned}$$

Onde P_i representa os valores estimados com modelo, O_i os valores observados, N número de observações, \bar{P} e \bar{O} correspondem à média aritmética dos valores estimados e observados.

O parâmetro MBE é o erro associado ao desvio médio, fornece informação sobre a performance de longa prazo do modelo. Um valor absoluto pequeno de MBE é uma condição necessária para uma boa performance do modelo, mas não suficiente. Valores positivos indicam que o modelo superestima as observações e vice versa.

O parâmetro $RMSE$ é o erro associado ao desvio quadrático médio, fornece informação sobre a performance de curto prazo do modelo em termos absolutos, indicando a maneira como o valor estimado pelo modelo se aproxima do valor real (observado). Em geral, valores pequenos de $RMSE$ indicam uma boa performance do modelo.

O índice de ajuste proposto por Willmott, [24], varia entre 0 e 1 e indica o nível de ajuste entre os valores estimados pelo modelo e os observados. Valores próximos de 1 são indicativos de uma boa performance.

Programação em linguagem *FORTRAN*

Utilizou-se para este trabalho a linguagem FORTRAN. Os programas foram desenvolvidos para:

- Leitura dos arquivos e filtragem dos dados;
- Cálculo de estimativas estatísticas (média mensal, desvio-padrão, erro associado);
- Localização mensal dos dias de céu claro;
- Cálculo da ROL utilizando os 10 modelos empíricos através das variáveis meteorológicas;
- Cálculo do *MBE*, *RMSE*, coeficiente *d*;
- Separação do conjunto de dados em parte diurna e noturna;
- Cálculo da Correção de Fairall para os dados de ROL.

Resultados

Remoção dos dados espúrios

A figura 6 apresenta o conjunto completo de dados utilizado neste trabalho.

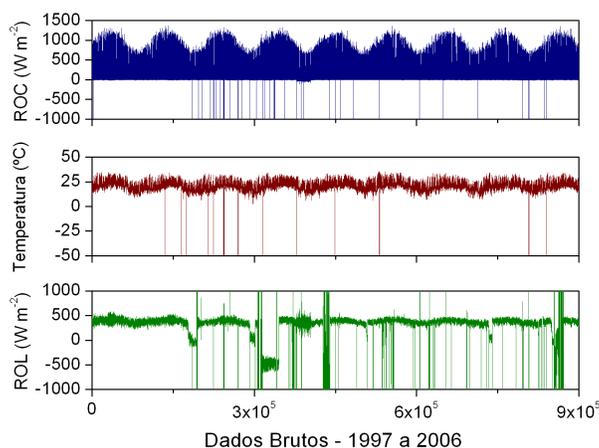


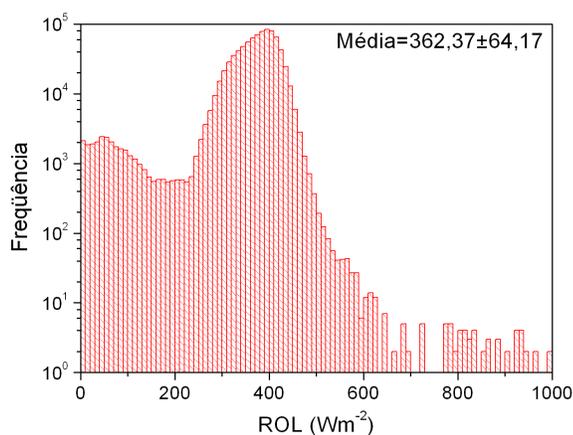
Figura 6: Série temporal de ROC, Temperatura e ROL

As falhas devido à incursão de sinal, são facilmente removidas do conjunto de dados brutos, (ROC, temperatura, umidade relativa e ROL) com uma subrotina em *FORTRAN*. Esse tipo de interferência, muitas vezes pode ocorrer por vários dias consecutivos. Assim, os valores de ROC, temperatura e umidade relativa podem ser filtrados sem muitos problemas, pois a maioria está relacionada a algum tipo de falta de conexão entre o sensor e o datalogger, causado por todo o tipo de condições ambientais de uma área urbana como São Paulo, (e.g. poluição).

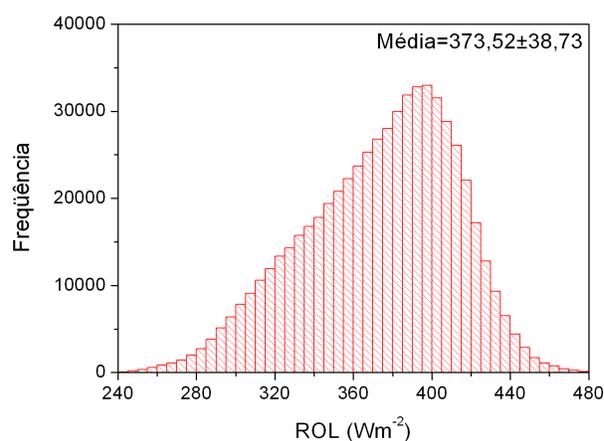
Para manter o conjunto de dados consistente, removeram-se simultaneamente todos os parâmetros meteorológicos, mesmo quando a falha acontece somente em um deles.

Um segundo passo consiste em remover valores de ROL localizados fora de dois desvios-padrão centrados na média ($362,37 \pm 64,17 W m^{-2}$), como indicado na figura 7(a). É

importante ficar claro que os limites escolhidos, $0 - 1000Wm^{-2}$, não interferem nos resultados encontrados, (média e desvio-padrão). O resultado desta filtragem é indicado na figura 7(b). O histograma indica que aproximadamente 98% das observações estão localizadas entre $235 - 490Wm^{-2}$. Os dados removidos da série de ROL também foram removidos das séries de temperatura, umidade e ROC.



(a) Histograma dos valores de ROL de $0-1000Wm^{-2}$



(b) Histograma dos valores filtrados de ROL

A figura 7 corresponde a 602134 valores ou aproximadamente 64 % da série original (978283 dados).

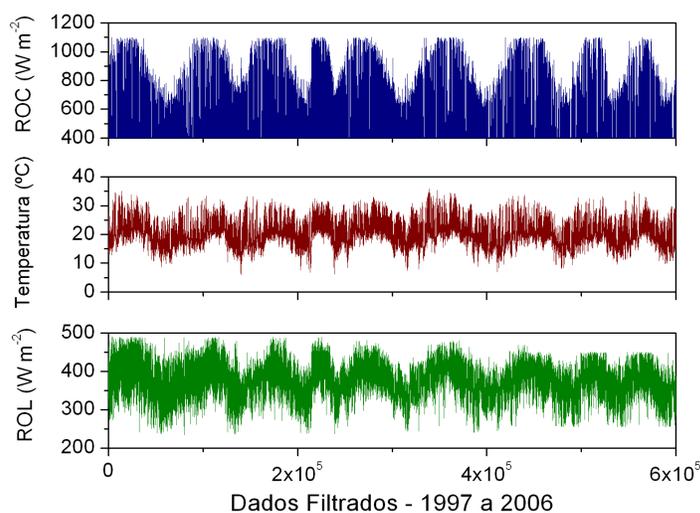


Figura 7: Valores filtrados de ROL, ROC, temperatura

Correção do efeito de emissão do domo utilizando Redes Neurais

Como já discutido, os dados de ROL devem ser corrigidos pela equação de Fairall, pois são medidos com um pirgeômetro que apresenta características as quais superestimam os valores de ROL, (emissão do domo). Compararam-se os resultados de ROL gerados pela RN com os valores calculados pela equação 3. Utilizou-se para tal os valores de ROL do ano de 2004, calculados pela formulação de Fairall e gerados pela RN.

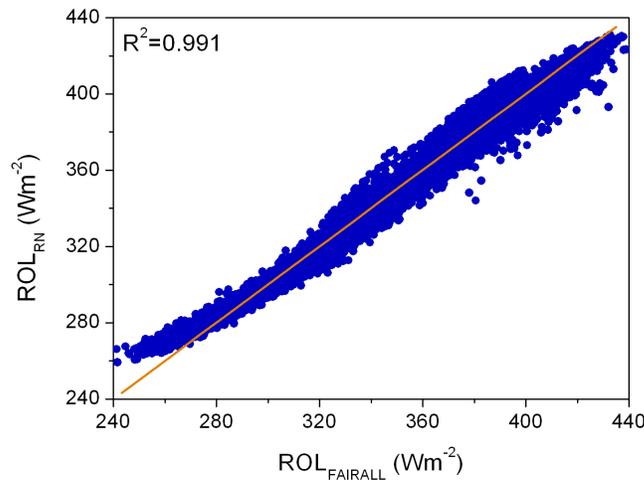


Figura 8: Diagrama de dispersão de ROL obtido pela RN e pela equação de Fairall durante o ano de 2004.

O coeficiente de correlação 0.991 indica compatibilidade entre os dados sintéticos e a série real de ROL. Os dados utilizados para o treinamento da RN (7 dias) em 2004, não foram incluídos no diagrama de dispersão.

O programa desenvolvido em *FORTTRAN* calcula a correção de Fairall, a qual utiliza os valores de temperatura do corpo do pirgeômetro e domo medidos na plataforma micrometeorológica através de dois termistores durante o período de 2004 – 2006. De posse dos valores corrigidos, analisou-se a diferença entre os valores sem correção e os valores corrigidos tanto pela equação de Fairall quanto pela Rede Neural.

Observa-se na figura 9 que a correção de Fairall é um fator importante para estimar a radiação de onda longa. Também, não há descontinuidade aparente na série após a

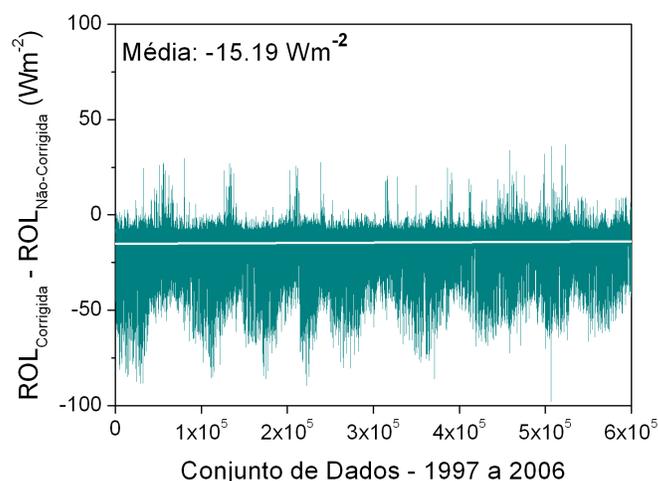


Figura 9: Evolução temporal da diferença entre a ROL bruta e corrigida

correção pela RN e a maioria dos valores é negativo. Uma correção negativa confirma que medidas não-corrigidas são afetadas pela ROC incidente no domo do pirgeômetro.

Performance da ROL

Com o intuito de avaliar a performance dos dados de ROL corrigidos, realizou-se uma comparação entre os dados medidos, (a partir de agora sempre corrigidos), no IAG-USP com as estimativas de satélite do projeto SRB-NASA.

O modelo utilizado pelo SRB apresenta uma grade de 1° e medidas com resolução temporal de 3 horas. Constantes aperfeiçoamentos são desenvolvidos desde o fim da década de 80, visando a melhor estimativa do efeito das nuvens baixas. Todos os parâmetros, exceto a altura da base da nuvem podem ser estimados pelos dados do SRB [10], [9].

A evolução sazonal da ROL observada em São Paulo, considerando Fairall e RN, está compatível dentro de uma incerteza com os valores estimados pelo SRB-NASA. Os erros são de 6% para a NASA [9] e 3,5% para o IAG-USP (ROL).

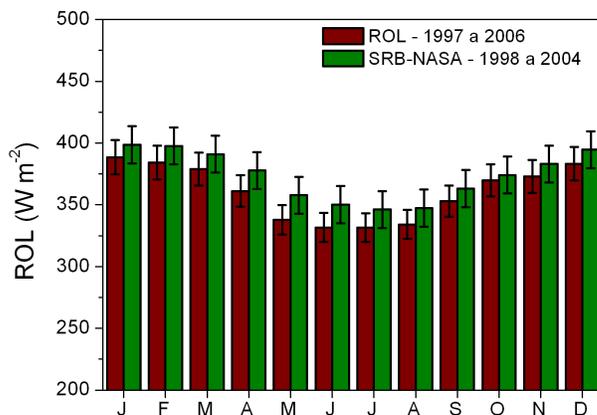


Figura 10: Comparativo entre SRB e ROL

Dias de céu claro

A frequência mensal de dias de céu claro, entre 1997 e 2006 é apresentada na figura 11. A distribuição sazonal indica a que a maior parte dos dias está concentrada no inverno. Como esperado, a maior quantidade de dias ocorre em Agosto, o mês mais seco do ano, [5]

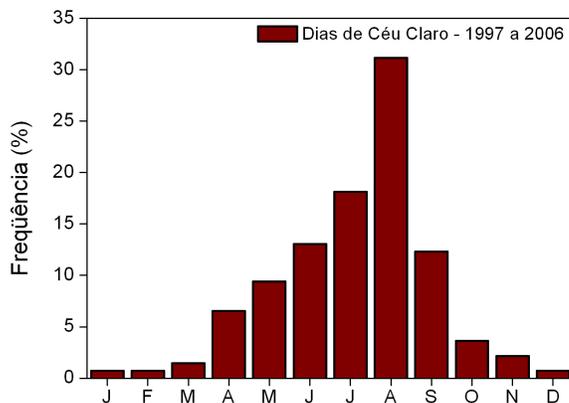


Figura 11: Evolução sazonal da frequência média mensal de dias de céu claro. Período 1997-2006.

Modelagem empírica

A performance dos 10 modelos empíricos pode ser visualizada comparando-se os parâmetros estatísticos MBE , $RMSE$ e o coeficiente d .

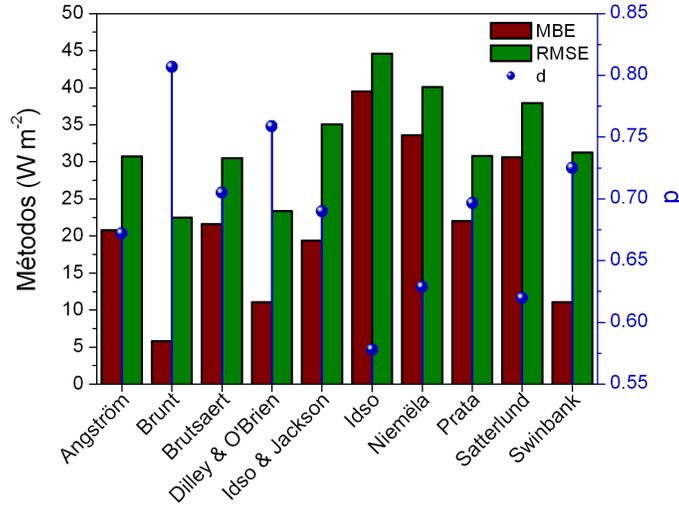


Figura 12: Performance dos modelos em termos dos parâmetros estatísticos

Observa-se na figura 12, que todos os modelos aplicados à base de dados do IAG-USP superestimam os valores de ROL, pois apresentam MBE sempre maior que zero. O modelo de *Brunt*, [2], foi o que melhor se ajustou aos dados, pois apresenta os menores valores de MBE, RMSE e o maior coeficiente d . Seu coeficiente d foi da ordem de 0,82. O resultado acorda com as conclusões fornecidas pelo MBE e RMSE. O MBE nos diz que *Brunt* superestima a ROL em torno de $6Wm^{-2}$. O RMSE apresentou um resultado em torno de $22Wm^{-2}$, apresentando uma variabilidade razoável. Além do modelo de *Brunt*, os modelos de *Swinbank* e *Dilley & O'Brien* apresentaram bons resultados.

Todos os modelos são muito sensíveis a variações na temperatura e pressão de vapor, por isso funcionam melhor durante a noite, como observa-se na figura 13, quando estes parâmetros são mais homogêneos. Isto se deve ao fato de não haver radiação de onda curta, que afeta de maneira significativa os valores de temperatura e pressão de vapor.

Os modelos novos sofisticaram os antigos introduzindo dependência com o conteúdo de água precipitável, (e.g. *Prata* e *Dilley & O'Brien*, [21]) ou ainda criaram modelos diferentes para condições diferentes de pressão de vapor [14].

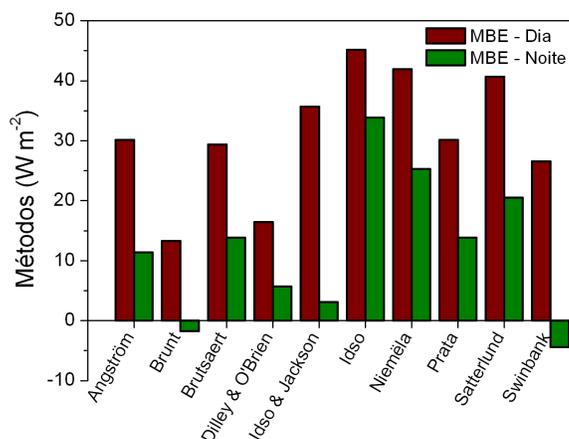
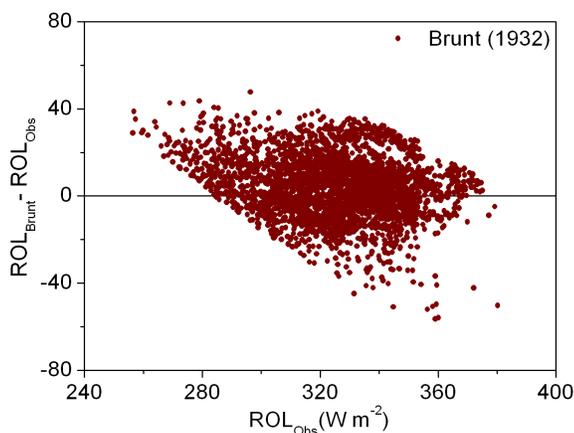
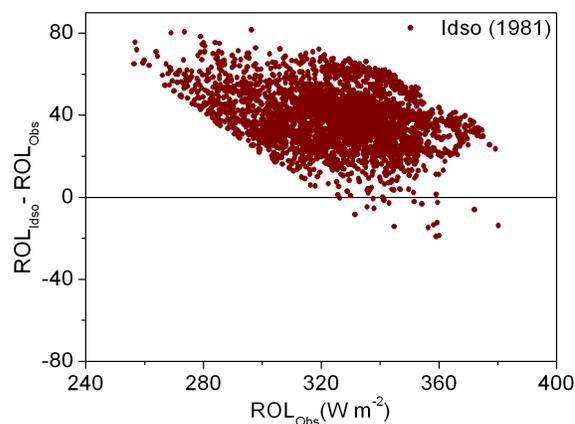


Figura 13: MBE para o período diurno e noturno

As diferenças entre os modelos devem-se principalmente à região escolhida por cada modelo para a calibração. Alguns modelos determinam seus coeficientes utilizando dados gerados por modelos de transferência radiativa ou dados climatológicos do Hemisfério Norte. Por exemplo, Dilley & O'Brien (1998) utilizaram um modelo de transferência radiativa, [14], para determinar os coeficientes de seu modelo. Nenhum modelo utiliza dados de regiões próximas à área de estudo, (São Paulo, Brasil). Daí vem a necessidade de tentar encontrar um modelo que utilize dados climatológicos para o Hemisfério Sul. Esta é uma das propostas futuras do grupo.



(a) Diagrama de dispersão para o modelo de Brunt



(b) Diagrama de dispersão para o modelo de Idso

Observa-se nas figuras 14(a) e 14(b) um diagrama de dispersão que mostra a variabilidade do modelo de Brunt (melhor) e o de Idso (pior) em relação aos dados de ROL medidos no ano de 2005. Nota-se que os diagramas são essencialmente semelhantes, diferindo somente na posição dos pontos. Idso está deslocado para cima, i.e., superestima ainda mais os valores.

Estudo de caso

O estudo de caso é realizado para que se possa compreender de maneira mais precisa o comportamento das formulações durante um dia inteiro, investigando onde existem maiores problemas ou onde os modelos desempenham um melhor papel. O dia utilizado foi 4 de Julho de 2005, (dia do ano 185). Neste dia, as condições foram típicas de um dia de céu claro. Com os dados desse dia investigou-se de maneira mais acurada as 10 formulações, calculando alguns parâmetros novos, como a umidade específica. O ciclo diurno, i.e., o comportamento da radiação de onda curta (global e difusa), já foi apresentado na figura 5. A seguir, o gráfico do comportamento das 10 formulações durante o dia.

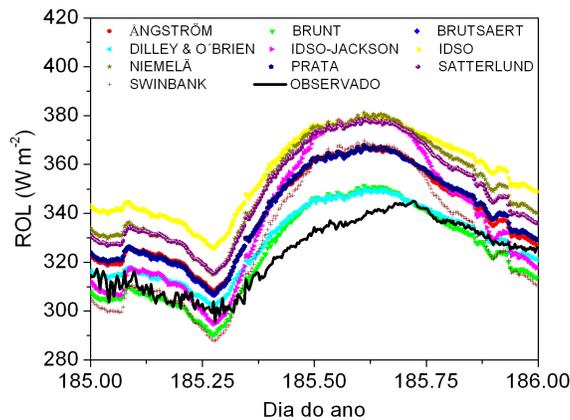


Figura 14: Comparação entre os dez modelos empíricos.

Observa-se que no estudo de caso o comportamento se repete. A formulação de Brunt apresenta outra vez o melhor resultado e Idso o pior. Todas funcionam melhor durante o período noturno. Apresentam-se mais algumas características do dia utilizado.

Observa-se nas figuras 16(a) e 16(b) que novamente a OL se comporta de maneira

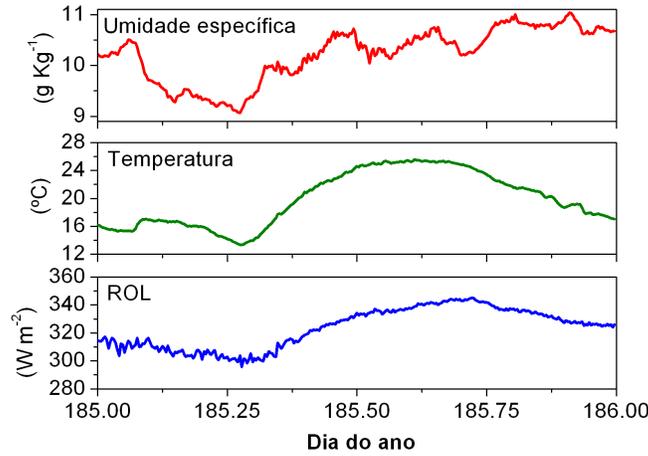
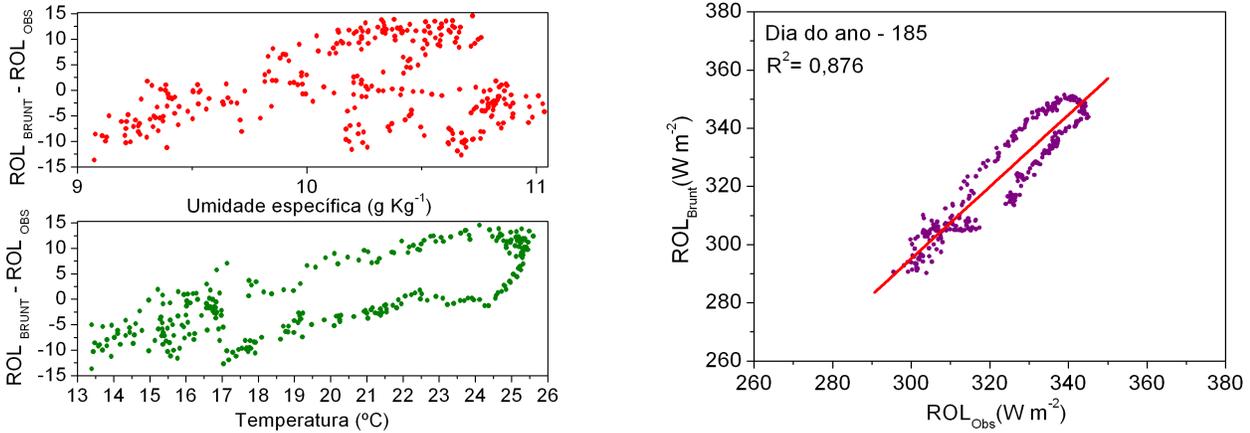


Figura 15: Umidade específica, temperatura e ROL para o dia 185.

mais semelhante à temperatura do que à umidade específica. Isso é justificado por todas elas basearem-se na Lei de Stefan-Boltzmann. A umidade específica mostrou-se praticamente constante durante todo o período, característica esta também de dias de céu claro. Observa-se no gráfico abaixo, um outro argumento para a uniformidade da umidade específica:



(a) Relação entre a umidade específica e temperatura com a diferença entre Brunt e IAG

(b) Correlação entre Brunt e IAG

Figura 16: Comparação entre ROL e o modelo de Brunt

O gráfico da correlação e da temperatura apresentam um perfil bastante semelhante.

O coeficiente de determinação entre o método do Brunt e o IAG foi de 88%. Isto mostra a compatibilidade dos métodos, ou seja, o modelo de Brunt explica em 88% a variabilidade dos dados de ROL.

Conclusão

Embora a série temporal utilizada neste trabalho, (ROC, ROL, temperatura e umidade relativa) apresente uma grande variedade de problemas, (principalmente a ROL) concluiu-se que a filtragem empregada apresentou-se bastante funcional, removendo $\approx 36\%$ da série original, reduzindo o grau de subjetividade e proporcionando um banco de dados confiável para o desenvolvimento deste trabalho e de trabalhos futuros, visto que os filtros desenvolvidos podem ser aplicados em outras séries de dados meteorológicos. Os dados do projeto *SRB-NASA* confirmaram a qualidade das medições filtradas de ROL do *IAG-USP*. Os resultados da comparação apresentaram valores compatíveis.

Os dados gerados pela *RedeNeural* apresentaram forte correlação com os dados de ROL corrigidos pela formulação de Fairall, $R^2 = 0,992$. Isto indica a compatibilidade entre os dados sintéticos e a série corrigida de ROL, validando os resultados da RN. Ainda, a correção do efeito de emissão da cúpula mostrou ser um fator importante na estimativa de ROL, reduzindo em aproximadamente $15Wm^{-2}$ os valores medidos pelo pirgeômetro e diminuindo o erro instrumental de 5% para 3,5%

Em São Paulo, os dias de céu claro, selecionados pelo método visual, concentraram-se nos meses de inverno (*Jun/Jul/Ago* $\approx 63\%$) apresentando seu máximo no mês de Agosto $\approx 32\%$. Para dias de céu claro, a expressão de *Brunt* é a que funciona melhor para estimar a ROL na cidade de São Paulo, com menores *MBE*, *RMSE* e maior coeficiente *d*: $5Wm^{-2}$, $22Wm^{-2}$ e 82%, respectivamente. Todos os valores de ROL estimados pelos 10 modelos apresentaram *MBE* positivo, indicando que eles superestimam a emissão de ROL da atmosfera. Notou-se também, que todos os modelos funcionam melhor durante a noite, pois apresentam uma redução considerável no *MBE*. As principais fontes de erro nas estimativas podem estar relacionadas à poluição atmosférica.

O *estudo de caso* corrobora com as conclusões anteriores, observou-se que durante o período noturno o comportamento dos modelos é mais próximo dos valores observados. Verificou-se também que os modelos são mais sensíveis às variações de temperatura do que

de umidade específica. Novamente o modelo de Brunt apresentou os melhores resultados, 88% de compatibilidade com os dados de ROL observados.

Um importante aspecto deste trabalho é que os resultados são inéditos, pois não existem observações de ROL disponíveis em São Paulo ou em qualquer outra região urbana do Brasil com a qualidade das utilizadas nessa pesquisa.

Dificuldades

Algumas etapas deste trabalho apresentaram maior dificuldade como por exemplo, o desenvolvimento dos programas em linguagem FORTRAN, num total de 6 que tomaram um tempo considerável. O filtro, detalhado no apêndice A, também consumiu bastante tempo, pois exigiu uma pesquisa em alguns assuntos um tanto complexos, como critérios de parada e alguns tipos de problemas numéricos. A compreensão teórica de alguns conceitos utilizados no trabalho, (estatísticos e na área de radiação) também exigiu especial atenção. A técnica de Redes Neurais também levou um certo tempo para ser finalizada, pois a série de dados possuía incompatibilidade nas medições de temperatura do corpo do pirgeômetro. As incertezas na constante de calibração do pirgeômetro também proporcionaram alguma dificuldade.

Outras atividades

Participação no XV Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo.

Título do trabalho: CARACTERIZAÇÃO DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA NA CIDADE DE SÃO PAULO - MODELAGEM EMPÍRICA E DESCRIÇÃO OBSERVACIONAL.

Em anexo estão o resumo e o certificado do Simpósio.

Foram cursadas as seguintes disciplinas (histórico escolar em anexo).

ACA0413 - METEOROLOGIA POR SATÉLITE: **Nota: 8,1**

ACA0429 - AGROMETEOROLOGIA: **Nota: 9,2**

ACA0437 - METEOROLOGIA DINÂMICA I: **Nota: 8,7**

MAP0214 - CÁLCULO NUMÉRICO COM APLICAÇÕES EM FÍSICA: **Nota: 9,2**

Perspectivas

OS PRÓXIMOS PASSOS DA PESQUISA SÃO:

- Utilizar os dados de material particulado da CETESB para estimar a relação entre a ROL e o grau de contaminação ambiental;
- Cálculo do valor horário médio mensal de concentração de material particulado nas estações da Lapa e Cerqueira César;
- Cálculo dos valores horários das variáveis meteorológicas utilizadas;
- Cálculo dos valores horários médios mensais de ROL;
- Concluir o filtro através da curva Gaussiana para a série de ROL;
- Propor um novo modelo de estimativa de ROL.

O programa, para cálculo dos totais horários, diários e mensais dos parâmetros meteorológicos descritos neste projeto, está concluído e disponível para a continuidade da caracterização média mensal de outras propriedades específicas da atmosfera da cidade de São Paulo.

Aproximação dos dados de ROL por uma Gaussiana

Está sendo desenvolvido uma metodologia de filtragem de dados que minimiza a subjetividade inerente às técnicas de tratamento de dados mais simplificadas.

A técnica consiste numa tentativa de aproximação do conjunto de dados de ROL por uma Gaussiana. Primeiramente se filtram os valores de ROL que são fisicamente impossíveis. O critério adotado foi utilizar um intervalo de $0 - 1000Wm^{-2}$ e excluir todos os valores fora dele.

Este primeiro filtro, mais simples, é importante porque o *datalogger* registra valores do tipo -99999 ou $+99999$ quando não recebe nenhum sinal do pirgeômetro. Tais valores, por serem em módulo, ordens de grandeza maiores do que os valores esperados para ROL, prejudicam de maneira significativa a estatística e, portanto, devem ser removidos para um melhor resultado. Pode-se agora trabalhar com um conjunto de dados de ROL que apresenta um intervalo menor, facilitando as conclusões. O resultado da filtragem aparece na figura A.1:

Com esse resultado, o método proposto prevê uma segunda etapa que consiste em separar em intervalos de 2 horas os valores de ROL, com o intuito de diminuir sua variabilidade. Após a separação, foi utilizada a aproximação por uma Gaussiana.

A separação é necessária, pois o conjunto completo de dados apresenta diferenças na emissão,(a ROL apresenta um ciclo diurno). Com a divisão da ROL em partes menores, o efeito do ciclo diurno é bastante minimizado.

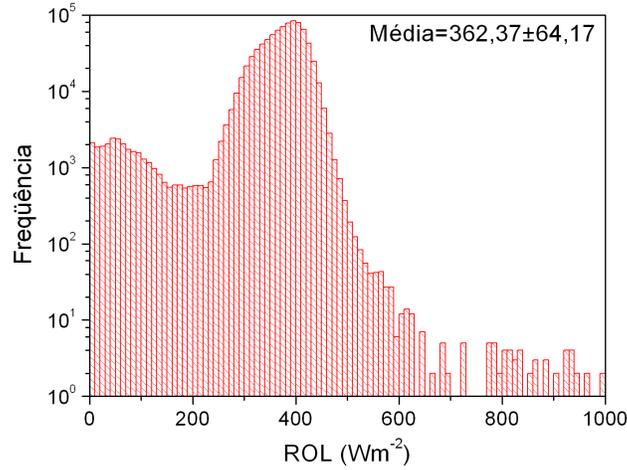


Figura A.1: Histograma dos valores de ROL

O próximo passo é comparar cada parte da série de dados, já dividida, com uma curva gaussiana, utilizando-se para tal o teste Chi-Quadrado reduzido [23].

Os resultados deste método foram adequados, mas necessitam ainda de alguma discussão matemática, pois existem algumas questões conceituais em aberto. O critério de parada precisa de alguma análise do custo-benefício, ainda subjetivo; o método permite uma aproximação significativa a uma curva gaussiana e a discussão principal encontra-se neste aspecto, pois ainda está aberta a questão de quando parar a filtragem.

A idéia do critério de parada é basear-se na tabela de Chi-quadrado e parar quando a série atingir compatibilidade com a curva Gaussiana, mas este método precisa de algum refinamento, pois o critério funcionaria somente para uma das caudas da distribuição.

Referências Bibliográficas

- [1] BÁRBARO, E. W., OLIVEIRA, A.P., SOARES, J., ESCOBEDO, J. Observational study of downward atmospheric longwave radiation at the surface in the city of São Paulo. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 27 de novembro a 1 de dezembro de 2006, Florianópolis, Santa Catarina (CDROM)*, 2006.
- [2] BRUNT D. Notes on radiation in the Atmosphere. I. *Q.J.R. Meteorol. Soc* **58**: 389-420, 1932
- [3] BRUTSAERT, W. *Water Resources Research* **11**: 742-744, 1975
- [4] CEBALLOS, J. C., BOTTINO, M.J., SOUZA, J.M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. *J Geophys Res.* **109**:D02211, 2004.
- [5] CODATO, G., OLIVEIRA, A.P., SOARES, J, ESCOBEDO, J.F., GOMES, E.N., e PAI, A.D. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast of Brazil. *Theoretical and Applied Climatology (to be published)*,2008.
- [6] Eppley Laboratory, INC. Instrumentation for the Measurement of the Components of Solar and Terrestrial Radiation.
- [7] FAIRALL, C.W., PERSSON,P.O.G., BRADLEY, E.F., PAYNE,R.E., e ANDERSON, S.P. A New Look at Calibration and Use of Eppley Precision Infrared Radiometers. Part I: Theory and Application. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **15**: 1229-1242, 1998.
- [8] GARRAT, J. Claer-Sky Longwave Irradiance at the Earth's Surface - Evaluation of Climate Models *American Meteorological Society* **14**: 1647-1670, 2001.
- [9] GUPTA, S. K., KRATZ, D.P., STACKHOUSE, P.W., Jr, W. , ANNE, C. The Langley Parameterized Longwave Algorithm (LPLA) for Surface Radiation Budget Studies *J. Appl. Meteor.* **31**: 1361-1367, 1992.

- [10] GUPTA, S.K., RITCHEY, N.A., WILBER, A.C. e WHITLOCK, C.H. A Climatology of Surface Radiation Budget Derived from Satellite Data *Journal of Climate* **12**: 2691-2710, 1999
- [11] KOVÁCS, Z.L. Redes neurais artificiais - Fundamentos & aplicações. *Livraria da Física*, 4 Ed., São Paulo, 2006.
- [12] KRETSCHMAR, J. G. Particulate matter levels and trends in Mexico City, São Paulo, Buenos Aires and Rio de Janeiro. *Atmos. Environ.* **28**: 3181-3191, 1994.
- [13] LIOU, K. N. An Introduction to Atmospheric Radiation. *Academic Press*, 2nd. Ed., San Diego California, 2002.
- [14] NIEMELÄ, N., RÄISÄNEN, P., SAVIJÄRVI, H. Comparison of surface radiative flux parameterizations Part I: Longwave radiation. *Atmos. Res.* **58**: 1-18, 2001.
- [15] OLIVEIRA, A.P., ESCOBEDO, J.F., PLANA-FATTORI, A., SOARES, J. e SANTOS, P. M. Medidas de radiação solar na Cidade de São Paulo: Calibração de piranômetros e aplicações meteorológicas. *Revista Brasileira de Geofísica.* **14**: 203-216, 1996.
- [16] OLIVEIRA, A.P., ESCOBEDO, J.F., MACHADO, A.J. e SOARES, J. Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the City of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theoretical and Applied Climatology.* **71(3-4)**: 231-249, 2002.
- [17] OLIVEIRA, A.P., ESCOBEDO, J.F., MACHADO, A.J. e SOARES, J. Correlation models of diffuse solar radiation applied to the City of São Paulo (Brazil). *Appl. Energy* **71(1)**: 59-73, 2002.
- [18] OLIVEIRA, A.P. e MACHADO, A.J. Relatório do projeto Estudo Observacional da Radiação Solar na Cidade de São Paulo. *Relatório Técnico. Departamento de Ciências Atmosféricas* 151 pp, 1999.
- [19] OLIVEIRA, A.P. e MACHADO, A.J. Relatório do projeto Estudo Observacional da Radiação Solar na Cidade de São Paulo, *Relatório Técnico. Departamento de Ciências Atmosféricas* 143 pp, 2001.

- [20] OLIVEIRA, A.P., SOARES, J., BOŽNAR, M.Z., MLAKAR, P. e ESCOBEDO, J.F. An application of neural technique to correct the dome temperature effects on pyrgeometer measurements. *J. Atmos. Oceanic technol.*, **23**, 80-89, 2006.
- [21] PRATA, A.J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **122**: 1127-1151, 1996.
- [22] SANCHEZ-CCOYLLO, O. R., DIAS, P.L.S., ANDRADE, M.F. e FREITAS, S. R. Determination of O_3 , CO and PM_{10} transport in the metropolitan area of São Paulo, Brazil through synoptic-scale analysis of back trajectories. *Meteorol Atmos. Phys.* **92**: 83-93, 2006.
- [23] WILKS D.S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. *Academic Press - International Geophysics Series 2nd. Ed.*, 2006.
- [24] WILLMOTT, C.J. On the validation of models. *Physic Geogr.* **2**: 184-94, 1981.
- [25] http://eosweb.larc.nasa.gov/GUIDE/dataset_documents/srb.html