

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 Final de atividades
Período: Agosto de 2007 a Agosto de 2008

Agosto de 2008

Resumo do projeto

Este trabalho avalia objetivamente a consistência e a qualidade da série de 9 anos de dados baseada em médias de 5 minutos de radiação de onda longa descendente (ROL), radiação de onda curta descendente, temperatura e umidade relativa. Ainda, descreve a variação sazonal da evolução diurna da onda longa na cidade de São Paulo. Além disto, este trabalho investiga a performance de 10 modelos empíricos de estimativa de ROL para dias de céu claro e propõe uma metodologia simples para o desenvolvimento de um novo modelo. Todos estes parâmetros foram observados simultaneamente e continuamente desde 1997 até 2006 na plataforma micrometeorológica localizada no topo do prédio do IAG-USP. O efeito de emissão da cúpula foi removido usando a técnica de redes neurais, reduzindo assim a incerteza nas medições para 3,5%. A comparação entre os valores médios mensais de ROL observados em São Paulo e as estimativas de satélite do projeto SRB-NASA indicou compatibilidade entre os valores. Os ciclos diurnos da ROL e respectiva emissividade indicaram uma variação que é determinada pelas evoluções da temperatura e umidade relativa em superfície. A presença de nuvens intensificou a média mensal de emissividade atmosférica em aproximadamente 8%. Durante o inverno o Aerosol Index (AI) indicou que o aerossol em São Paulo absorve mais do que espalha radiação. A comparação entre os modelos indicou que o novo modelo apresentou os melhores resultados, com os menores MBE, RMSE e maior coeficiente de determinação, portanto o novo modelo é o mais indicado para estimar a emissão de onda longa da atmosfera sob condições de céu claro na cidade de São Paulo.

Índice

Introdução	1
Plataforma micrometeorológica	2
O Pirgeômetro	2
Correção de Fairall	3
Redes neurais	4
Fluxo de radiação de onda longa atmosférica	5
O projeto SRB-NASA	6
Impacto da Poluição	6
Índice AI	7
Modelos empíricos	7
Análise de fatores	8
Metodologia	9
Instrumentação	9
Filtragem dos dados	10
Correção de Fairall & Redes Neurais	10
Dias de céu claro	11
Modelagem empírica	12
Resultados	14
Remoção dos dados espúrios	14

Correção do efeito de emissão do domo utilizando Redes Neurais	16
Performance da ROL	17
Dias de céu claro	18
Caracterização Sazonal	19
Caracterização do Material Particulado	20
Índice AI	22
Modelagem empírica	23
Conclusão	26
Dificuldades	28
Outras atividades	29
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, [16]. 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, [28].

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, [21], [22], [23]. Para investigar o papel desempenhado por esse poluente, é crucial desenvolver modelos mais acurados de estimativa de ROL na cidade de São Paulo, bem como aprimorar as medidas de satélite, [7].

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, [22]. O segundo, é avaliar a performance de 10 modelos empíricos disponíveis na literatura e propôr um novo modelo 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, [24]. A partir de 1997, foram iniciadas também, observações contínuas de ROL, temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e precipitação, [25]. 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 $3\mu m$, [26]. 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.

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.

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

$$ROL_F = ROL + 3,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(T_c + 273)^4 - (T_d + 273)^4] \quad (1)$$

Após a validação da expressão, Fairall, [11] determinou sua constante de sensibilidade s_F e comparando-a com a original s encontrou:

$$\frac{s}{s_F} = 1,043 \quad (2)$$

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 1 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% [26], [11].

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. [15]

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*.

A figura 2 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

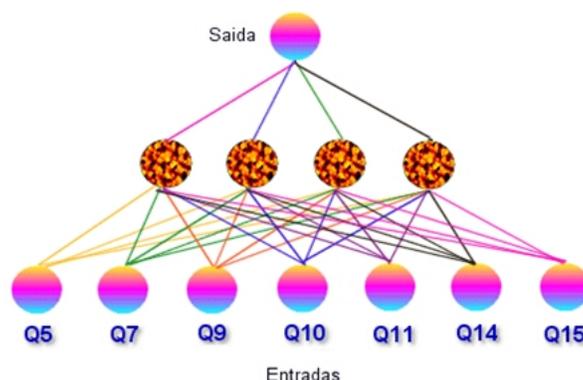


Figura 2: Esquema da RN

(*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, [18].

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, [17], 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 [14].

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. [32]

Impacto da Poluição

Uma alternativa para investigar o impacto da poluição do ar na evolução sazonal da ROL na RMSP é analisar o conteúdo de material particulado na atmosfera, o PM_{10} . A CETESB, utilizando o método atenuador beta,[8], mede valores horários de PM_{10} em superfície.

Uma característica importante é que a maioria do material particulado em São Paulo é gerada localmente por poeira, (re-suspensão) e por combustão de combustíveis fósseis. Em ambos os casos o aerossol possui um caráter absorvedor. Somente uma pequena fração é sal marítimo, o qual é trazido pela brisa marítima que penetra em São Paulo sistematicamente no início da tarde. Este tipo de aerossol contribui significativamente para o espalhamento da radiação solar, aumentando o montante de radiação difusa, cite.

Índice AI

Uma maneira de caracterizar as propriedades radiométricas do aerossol na RMSP é utilizando o *aerosol index*, (AI) ou Índice AI. O AI é calculado a partir de estimativas de satélite, [29]. O AI é uma medida de quanto a dependência do comprimento de onda da radiação UV retro-espalhada de uma atmosfera contendo aerossóis (espalhamento Mie, Rayleigh e absorção) difere de uma atmosfera com espalhamento puramente molecular, (somente espalhamento Rayleigh). Quantitativamente o AI é definido como:

$$AI = 100 \log \left(\frac{I_{360}^{med}}{I_{360}^{calc}} \right) \quad (3)$$

Onde I_{360}^{med} é a radiância 360nm EP-TOMS medida e I_{360}^{calc} é a radiância para uma atmosfera somente com espalhamento molecular. Sob a maioria das condições, o AI é positivo para aerossóis absorvedores e negativo para aerossóis não-absorvedores (espalhamento Rayleigh). Esta técnica já foi utilizada para mostrar que a poeira do Saara é correlacionada com anomalias negativas de TSM.

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 [26].

Desta forma, modelos empíricos podem ser úteis, pois utilizam somente temperatura de superfície e pressão de vapor do ar, [27], [18], [12]. 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 trans-

ferência radiativa, expressões empíricas e observações *in situ*.

Análise de fatores

A análise de fatores é possivelmente a técnica estatística multivariada mais utilizada em Meteorologia [30]. A proposta é reduzir um conjunto de dados contendo um grande número de variáveis para um conjunto bem menor de novas variáveis independentes, (fatores) e procurar eixos (auto-vetores) em torno dos quais, as amostragens representadas num sistema de coordenadas N-dimensional tendem a se agrupar, [30]. As variáveis são, geralmente, normalizadas para média 0 e desvio padrão 1. Tal procedimento permite a inclusão de variáveis com diferentes unidades e ordens de grandeza, sem prejudicar a análise. A partir da matriz dos dados normalizados determina-se a matriz de correlação. Esta matriz é representada em função dos termos de seus autovalores e autovetores, [30], [1]. Embora esses eixos expliquem toda a variância do sistema, não têm o melhor alinhamento com as direções de máxima variância. Assim, a fim de se realinhar os fatores principais com as direções de máxima variância dos dados é feita a rotação dos autovetores, [1].

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 [23].



Figura 3: 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, [24] e [25]. 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-padrão.

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 1, 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 pelo método heurístico, utilizando padrões como seco, úmido, frio, quente, nublado e dias

de céu claro. Baseado no estudo feito por Oliveira, [26], 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, [26], 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, [9].

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

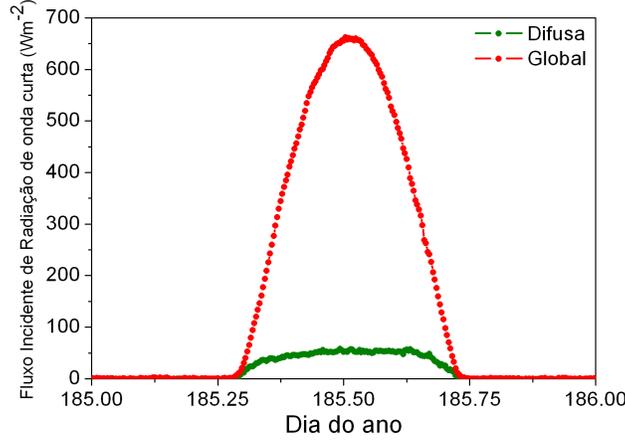


Figura 4: Dia de céu claro

Modelagem empírica

Grande parte dos modelos apresentados é baseado em relações empíricas derivadas de observações, sem que existam justificas teóricas para seu uso [18], [5], outros utilizam ainda aproximações da ETR (e.g. Brutsaert, [6]). A tabela a seguir apresenta as 10 expressões baseadas em Prata e Niemela, [27] e [18] 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)	$[1 - 0.261 \exp(-7.77 \times 10^{-4} (273 - T_0)^2)] \sigma T_0^4$
Brutsaert (1975)	$1.24 \left(\frac{e_0}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}} \sigma T_0^4$
Satterlund (1979)	$1.08 \left[1 - \exp\left(-e_0^{\frac{1}{2016}}\right)\right] \sigma T_0^4$
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)	$\left\{1 - \left(1 + 46.5 \left(\frac{e_0}{T_0}\right)\right) \exp\left[-\left(1.2 + 3 \left(46.5 \left(\frac{e_0}{T_0}\right)\right)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right\} \sigma T_0^4$
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 [31], calculados da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 MBE &= \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \\
 RMSE &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \\
 d &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)} \tag{4}
 \end{aligned}$$

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 longo 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, [31], 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.

Resultados

Remoção dos dados espúrios

A figura 5 apresenta o conjunto completo de dados utilizado neste trabalho.

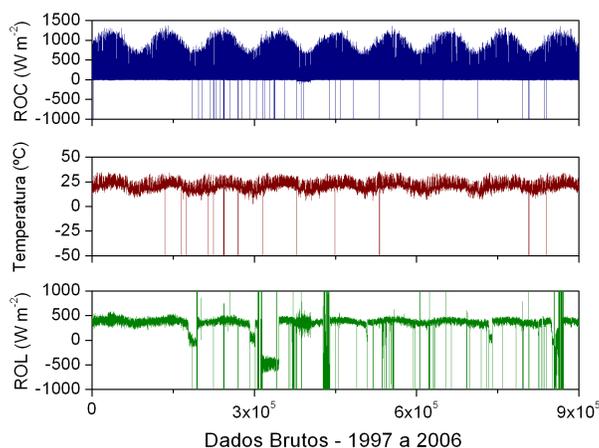


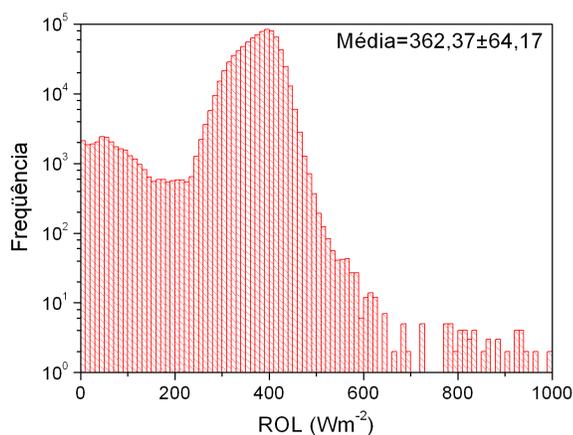
Figura 5: Série temporal de ROC, Temperatura e ROL

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).

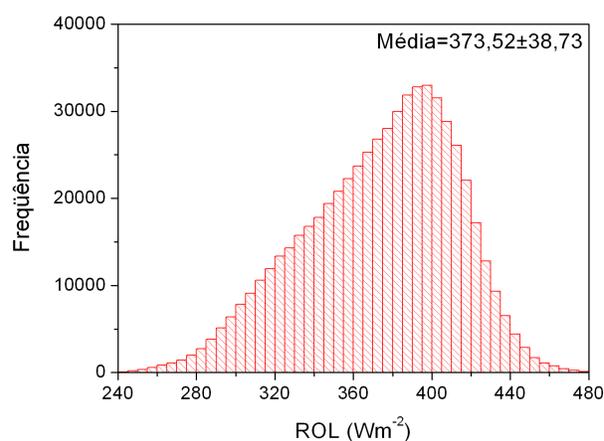
Para manter o conjunto de dados consistente, removeram-se simultaneamente todos os parâmetros meteorológicos, mesmo quando a falha acontece somente em um deles.

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 6(a).

Destaca-se que os limites escolhidos, $0 - 1000Wm^{-2}$, não interferem nos resultados encontrados, (média e desvio-padrão). O resultado desta filtragem é indicado na figura 6(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 6 corresponde a 602134 valores ou aproximadamente 64 % da série original (978283 dados).

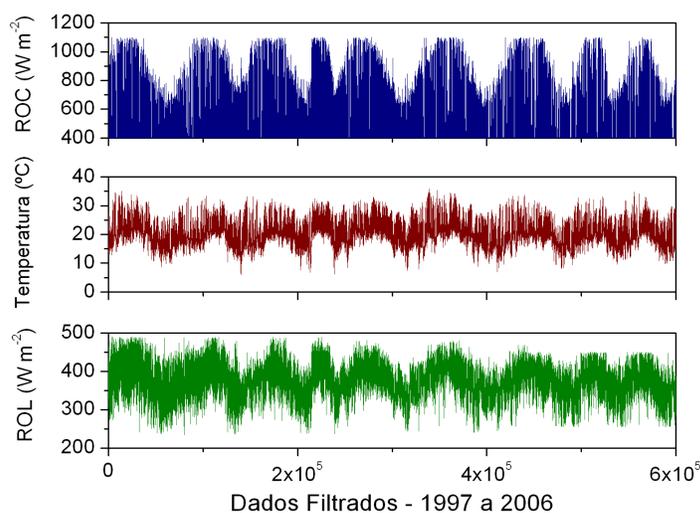


Figura 6: Valores filtrados de ROL, ROC, temperatura

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 1. Utilizou-se para tal os valores de ROL do ano de 2004, calculados pela formulação de Fairall e gerados pela RN.

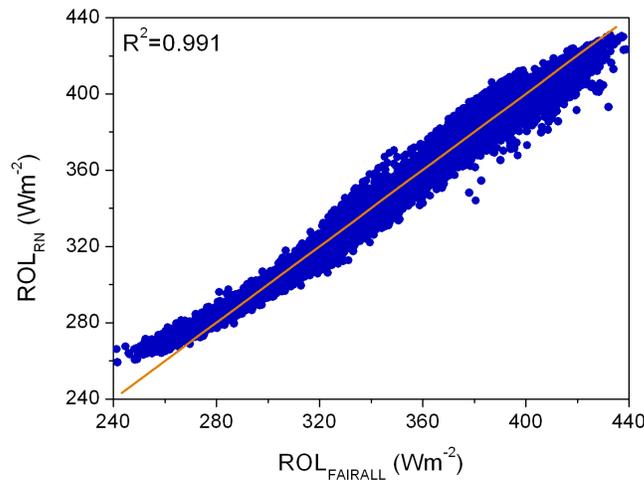


Figura 7: Diagrama de dispersão de ROL obtido pela RN e pela equação de Fairall durante o ano de 2004.

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 8 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

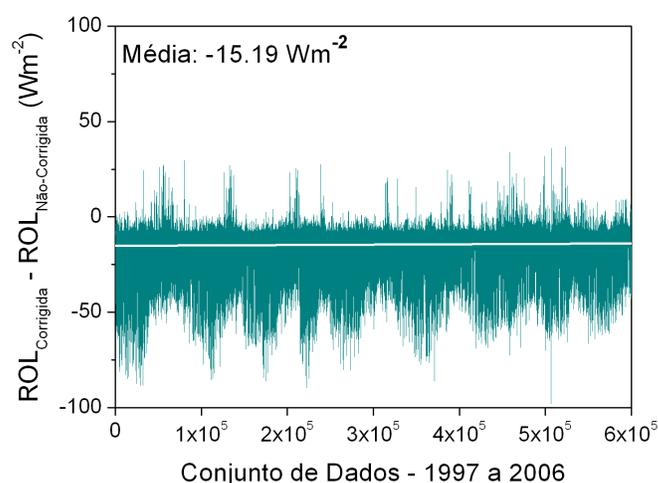


Figura 8: Evolução temporal da diferença entre a ROL bruta e corrigida

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 [14], [13].

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 [13] e 3,5% para o IAG-USP (ROL).

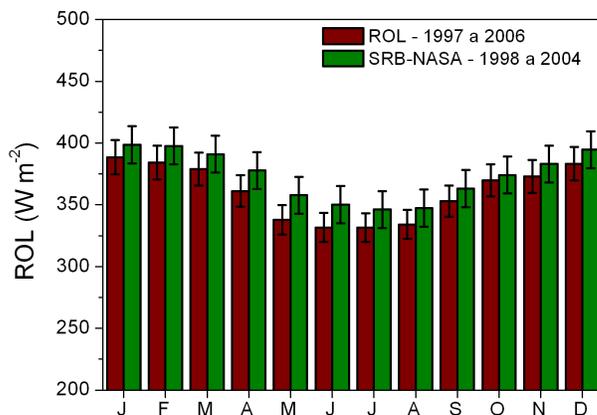


Figura 9: Comparativo entre SRB e ROL

Dias de céu claro

A frequência mensal de dias de céu claro, entre 1997 e 2006 é apresentada na figura 10. A distribuição sazonal indica 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, [9]

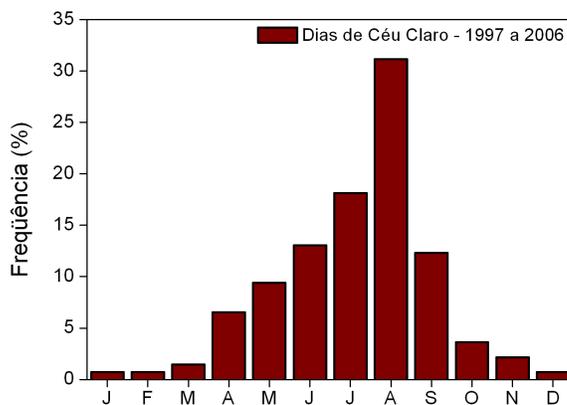


Figura 10: Evolução sazonal da frequência média mensal de dias de céu claro. Período 1997-2006.

Caracterização Sazonal

A variação sazonal dos valores horários médios mensais da ROL, em Wm^{-2} , na RMSP é apresentada na figura a seguir. Observa-se que em São Paulo o máximo de radiação ocorre durante o dia e durante o verão. Este padrão reflete as condições climáticas de temperatura, umidade, nuvens e poluição.

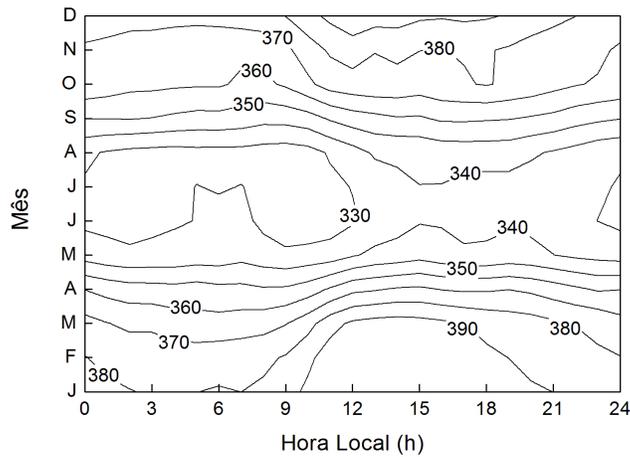


Figura 11: Variação sazonal dos valores médios mensais ROL

A evolução diurna dos valores médios mensais de ROL, temperatura do ar, umidade relativa e emissividade atmosférica durante o mês de agosto na RMSP é mostrada na figura abaixo.

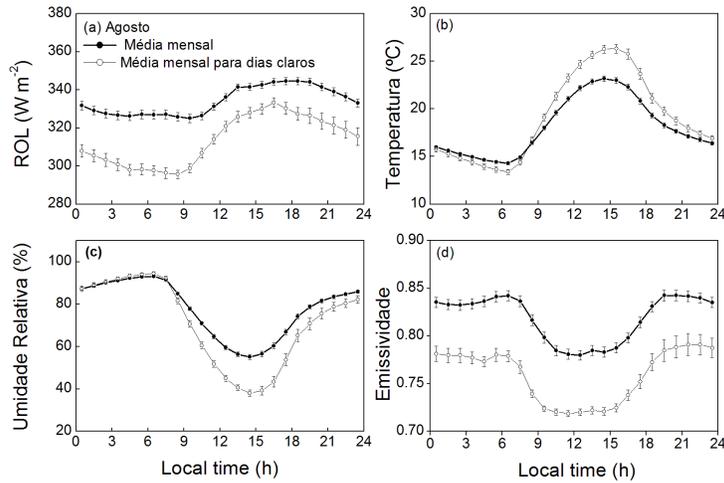


Figura 12: Evoluções diurnas dos valores médios mensais

Com o objetivo de isolar o efeito das nuvens, foram incluídos na figura 12 os mesmos parâmetros considerando somente dias de céu claro. A amplitude diurna da ROL sob condições de céu claro é maior se comparada à sua amplitude considerando todos os dias. As nuvens possuem um grande impacto na evolução noturna, aumentando a ROL. A evolução diurna da temperatura durante dias claros não apresenta grandes diferenças do seu comportamento quando todos os dias são considerados. Um comportamento similar é encontrado quando analisamos a umidade relativa. Entretanto, a evolução diurna da emissividade durante os dias claros apresenta um contraste mais evidente se comparada aos outros parâmetros. A razão para isso é que as nuvens são responsáveis por uma forte contribuição na emissão da atmosfera na RMSP em comparação aos pequenos contrastes de temperatura e umidade observados quando nuvens estão presentes na RMSP.

Caracterização do Material Particulado

Neste trabalho foram utilizadas duas estações da CETESB, Cerqueira César e Lapa. Estas estações estão localizadas respectivamente a 6 e 4 Km de distância da plataforma micrometeorológica do IAG-USP onde as medidas de ROL são realizadas. Os dados utilizados para avaliar a média mensal de PM_{10} , corresponde a 9 anos de observações contínuas de 1997 a 2005. A evolução sazonal dos valores diários médios mensais de PM_{10} são indicados a seguir:

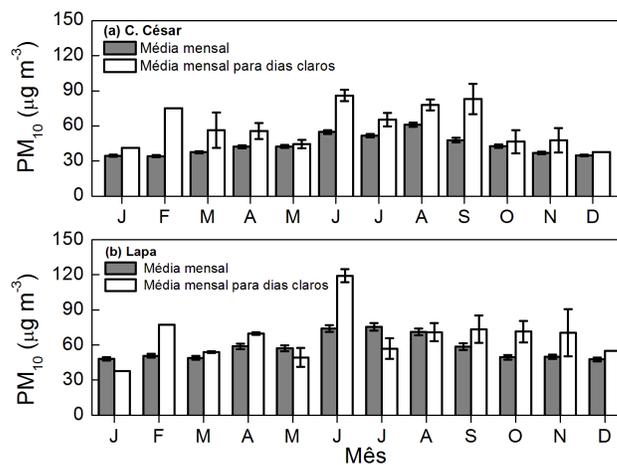


Figura 13: Valores diários médios mensais para o PM_{10} em C.César e Lapa

Os valores de PM_{10} são mais altos durante o inverno em ambas as estações, inclusive quando consideram-se somente os dias claros. O maior valor foi $120\mu g m^{-3}$, ocorrendo na Lapa, no mês de Junho para dias claros. As evoluções sazonais de PM_{10} são correlacionáveis, indicando que o alto grau de poluição é um efeito regional na RMSP durante todos os meses do ano. Baseado neste fato, este trabalho utiliza o PM_{10} medido em C.César como representativo da área onde as medidas de ROL são efetuadas.

A figura a seguir apresenta a evolução diurna dos valores horários médios mensais de PM_{10} para a RMSP durante o mês de Agosto, pois as maiores concentrações de PM_{10} são observadas durante condições de céu claro. Como indicado nas seções anteriores, a emissividade da atmosfera apresenta uma evolução diurna que parece ser fortemente correlacionada com a temperatura do ar e a umidade relativa. Entretanto, não foi encontrada correlação estatisticamente significativa entre a emissividade e o material particulado, observados simultaneamente durante condições de céu claro.

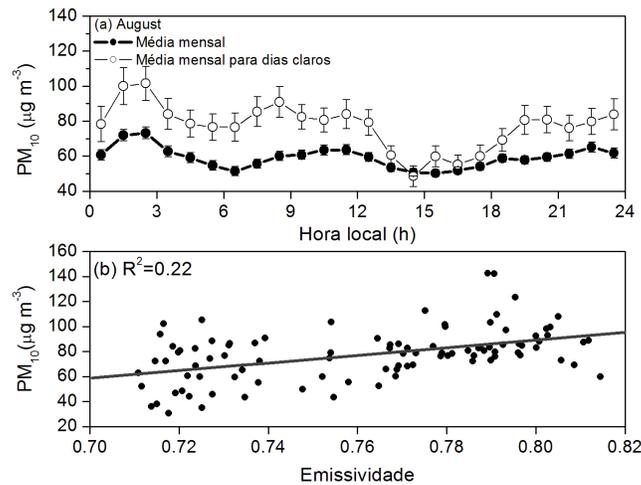


Figura 14: (a) Evolução diurna do PM_{10} (b) correlação entre o PM_{10} e a emissividade

A questão é por que o PM_{10} é diretamente correlacionado com a radiação solar em escala local [22] e em escala regional [9], mas não está correlacionado com a emissividade da atmosfera.

Índice AI

Na figura a seguir é apresentada a evolução temporal dos valores diários de MP_{10} nas estações da Lapa e C.César, chuva acumulada e índice AI, observados durante o verão (a,b) e inverno (c,d).

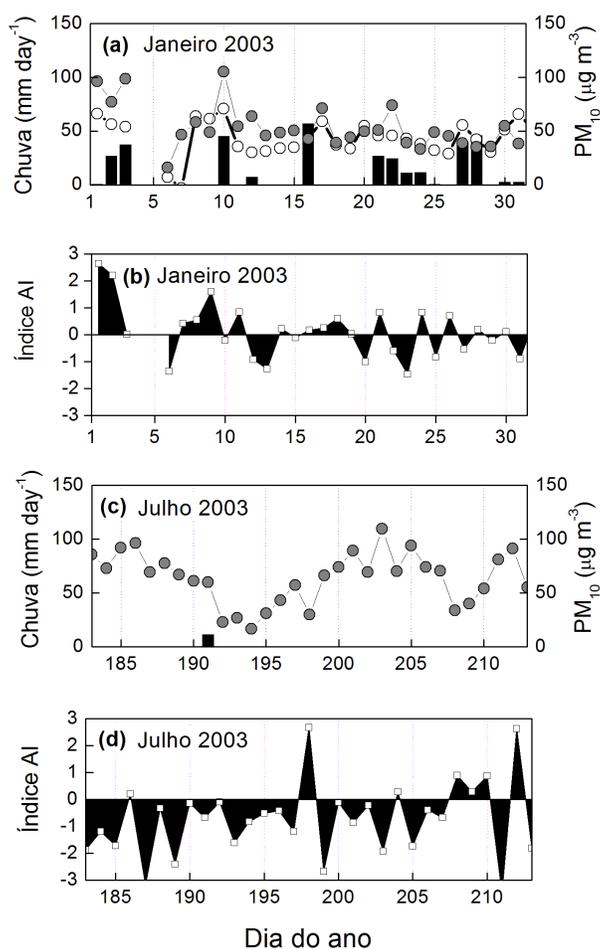


Figura 15: Chuva, AI e MP_{10} para (a) Verão (b) Inverno

A chuva limpa a atmosfera e reduz a concentração de material particulado, portanto o aerossol presente na atmosfera deve refletir as condições das fontes locais de poluente, atenuando assim o efeito de inserção de poluentes por outras fontes. Entretanto, não há um padrão claro relacionando o AI e o material particulado durante o verão, i.e. algumas vezes o AI é positivo, indicando que o aerossol está refletindo radiação, mas outras vezes é negativo, indicando que o aerossol presente na RMSF está absorvendo radiação.

Os histogramas a seguir mostram de maneira mais clara este comportamento:

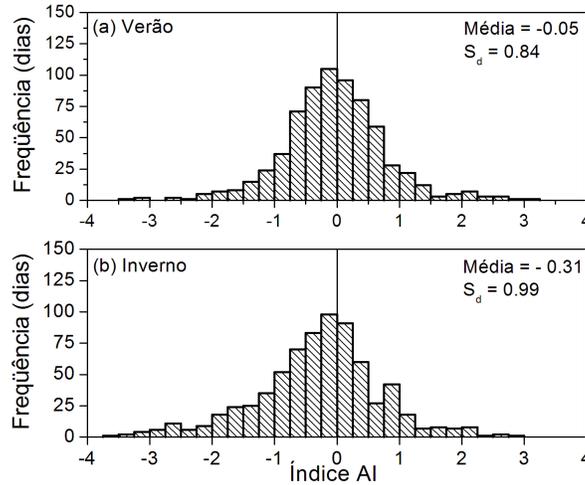


Figura 16: Histograma do Índice AI para (a) Verão (b) Inverno

O histograma do AI para o Verão e Inverno indica que durante o inverno o aerossol na RMSP absorve mais do que espalha radiação. Durante o verão, o aerossol tanto absorve quanto espalha radiação.

Modelagem empírica

A grande parte dos modelos utilizados neste trabalho utilizam dados climatológicos do Hemisfério Norte. Baseado na importância das estimativas de ROL e no fato de não haver nenhum modelo que utilize dados da região em estudo, um novo modelo de estimativa de ROL para dias claros foi desenvolvido. Para tanto, o conjunto de dados foi dividido em 2 partes (65% and 35%), selecionados ao acaso. A parte maior foi utilizada para calibrar o modelo e a outra para o teste. O novo modelo utiliza uma regressão não-linear e é baseado em uma análise de fatores que determina as componentes principais para a estimativa de ROL. A figura a seguir mostra a ponderação de cada fator, (factor loadings) da análise de componentes principais.

Por um lado, o fator 1 é fortemente correlacionado com a ROL e a temperatura, i.e. explica a variância da ROL e temperatura. A pressão de vapor também apresenta uma contribuição importante neste fator. Por outro lado, o fator 2 explica a variabilidade da temperatura e da pressão de vapor mas não explica da ROL. Este resultado indica que a

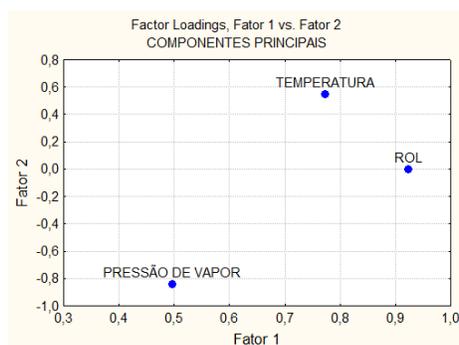


Figura 17: Análise de componentes principais

temperatura e a pressão de vapor estão fortemente correlacionados, (negativamente). Portanto, a análise de fatores indica que os principais estimadores de ROL são a temperatura e a pressão de vapor.

A regressão não-linear desenvolvida neste trabalho consiste num ajuste matemático utilizando como preditores o resultado da análise de fatores, (pressão de vapor e temperatura) e como variável dependente a ROL. O resultado final do ajuste é a expressão que melhor representa a dispersão dos dados de ROL, ou seja, a expressão que melhor aproxima os dados de ROL apresentando o maior coeficiente de determinação.

O novo modelo em sua forma final é apresentado a seguir:

$$\begin{aligned}
 ROL = 1827.23 + 31.35 \times T - 35.06 \times e - 967.82 \times LN(T) - \frac{7725.26}{T} + \\
 + 390.92 \times \sqrt{e} + \frac{2372.20}{e} \quad (5)
 \end{aligned}$$

onde T e e são respectivamente a temperatura e a pressão de vapor.

A performance dos 10 modelos testados e do novo modelo pode ser visualizada comparando o MBE, RMSE e o coeficiente d , como é indicado na figura a seguir:

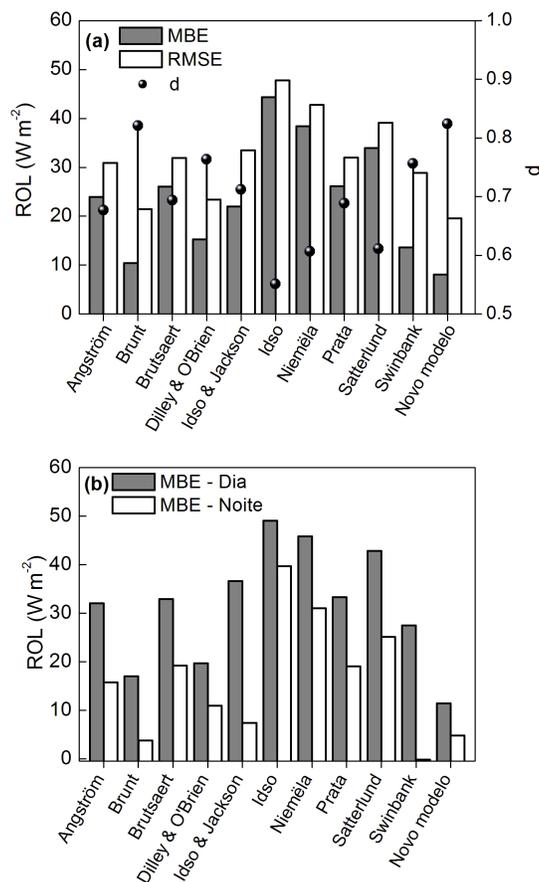


Figura 18: Performance dos modelos em termos dos parâmetros estatísticos

Todos os modelos usados neste trabalho superestimam a ROL pois apresentam MBE positivo. O novo modelo apresenta os melhores resultados, com os menores MBE e RMSE e o maior coeficiente d . 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 18, 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.

Conclusão

Os objetivos principais deste trabalho foram realizar uma caracterização da evolução sazonal da ROL na cidade de São Paulo e avaliar a performance de 10 modelos empíricos disponíveis na literatura para estimar ROL. Além disso, foi proposto um novo modelo para estimativa de ROL. 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.

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 foi 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 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%.

Os dados do projeto *SRB-NASA* confirmaram a qualidade das medições filtradas de ROL do *IAG-USP*. Os resultados da comparação apresentaram valores sempre compatíveis. Durante o verão e o período diurno, a ROL observada apresenta um máximo. Este padrão reflete o clima local, i.e. quantidade de vapor d'água, temperatura, nuvens e poluição. O impacto da poluição foi analisado, indicando que os valores diários de PM_{10} são altos durante todo o ano, mesmo quando somente são considerados os dias de céu claro. O índice AI indica que durante o Inverno o aerossol na RMSP absorve mais do que espalha radiação.

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, o novo modelo é o que funciona melhor para estimar a ROL na cidade de São Paulo, com menores *MBE*, *RMSE* e maior coeficiente *d*: $8,09Wm^{-2}$, $19,54Wm^{-2}$ e $0,824$, respectivamente. Todos os valores de ROL estimados pelos 11 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 devem estar relacionadas à poluição atmosférica.

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. A compreensão teórica de alguns conceitos utilizados no trabalho, (estatísticos e na área de radiação) também exigiu especial atenção. A técnica de Redes Neurais 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 proporcionaram alguma dificuldade. Os dados de material particulado 10 da CETESB apresentaram muitos problemas e os dados de material particulado 2.5 solicitados várias vezes não foram disponibilizados. Devido ao projeto abordar muitos temas diferentes foi necessária muita pesquisa bibliográfica que demandou um tempo considerável. A familiarização com os dados do índice AI foi outra parte importante do trabalho apresentando alguns problemas. Por último, o desenvolvimento do novo modelo tomou, sem dúvida alguma, a maior parte do tempo, pois foi necessário o rápido aprendizado das técnicas empregadas, e.g. análise de fatores e modelos não-lineares.

Outras atividades

Monitoria em Análise Exploratória de Dados e Métodos Estatísticos.

Curso de Verão do Instituto de Matemática e Estatística da USP.

Período: Janeiro a Fevereiro de 2008

Monitoria em Climatologia I.

Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP.

Período: Fevereiro a Junho de 2008

Extensão universitária em Introdução à Dinâmica dos Fluidos Computacional.

Carga horária: 40h.

Instituto de Matemática e Estatística, USP.

Extensão universitária em Tratamento Numérico de Equações Diferenciais.

Carga horária: 120h.

Curso de Pós-Graduação no Instituto de Matemática e Estatística, USP.

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

Obtenção de Menção Honrosa no XV Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo.

Obtenção de Prêmio do Programa de Intercâmbio USP - Rutgers concedido aos 10 melhores trabalhos apresentados no XV SIICUSP, Universidade de São Paulo & Rutgers University

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

Em anexo estão o resumo, o certificado do Simpósio bem como da menção honrosa.

BÁRBARO, E. W., OLIVEIRA, A.P., SOARES, J., FERREIRA, M.J., MLAKAR, P., BOZNAR, M.Z., ESCOBEDO, J. Patterns of longwave radiation emission from the atmosphere in a Megacity: São Paulo, Brazil. *Revista de Iniciação Científica do Centro de Tecnologia Educacional para Engenharia da Escola de Engenharia de São Carlos-USP*, **8**, (prelo).

Participação no 2008 Student Chapter Poster Competition.

Título do trabalho CHARACTERIZATION OF DOWNWARD ATMOSPHERIC LONG WAVE RADIATION IN THE CITY OF SÃO PAULO - MODELING AND OBSERVATIONAL DESCRIPTION.

Participação no The Fourth Annual University-wide Undergraduate Research Symposium.

Título do trabalho CHARACTERIZATION OF DOWNWARD ATMOSPHERIC LONG WAVE RADIATION IN THE CITY OF SÃO PAULO - MODELING AND OBSERVATIONAL DESCRIPTION.

Em anexo estão o resumo e o certificado do Simpósio

Participação no International Radiation Symposium 2008.

Título do trabalho: DOWNWARD ATMOSPHERIC LONGWAVE RADIATION IN THE CITY OF SÃO PAULO

Em anexo estão o artigo e o certificado do Simpósio.

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

ACA0422 - METEOROLOGIA SINÓTICA: **Nota: 8,9**

ACA0438 - METEOROLOGIA DINÂMICA II: **Nota: 8,2**

ACA0226 - CLIMATOLOGIA II: **Nota: 8,5**

ACA0321 - MICROMETEOROLOGIA: **Nota: 9,2**

Referências Bibliográficas

- [1] ANDRADE, M. F, KERR, A., ORSINI, C. *Notas de aula da disciplina Meteorologia Ambiental, Modelos Multivariados, 2005.*
- [2] 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.*
- [3] BOZNAR, M. e MLAKAR, P. *Improvement of air pollution forecasting models using feature determination and pattern selection strategies. Air pollution modeling and its application XII. Eds. S.-E. Gryning and N. Chaumerliac. Plenum Press, New York, 725-726, 1998.*
- [4] BOZNAR, M. e MLAKAR, P. *Use of neural networks in the field of air pollution modeling. Air pollution modeling and its application XV. Eds. C. Borrego and G. Schayes. Kluwer Academic, New York, 375-383, 2002.*
- [5] BRUNT D. *Notes on radiation in the Atmosphere. I. Q.J.R. Meteorol. Soc* **58**: 389-420, 1932
- [6] BRUTSAERT, W. *Water Resources Research* **11**: 742-744, 1975
- [7] 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.
- [8] *Technical report on air quality in the State of São Paulo - Environmental State Secretary, ISSN 0103-4103, São Paulo, Brazil, 137pp. (Available in Portuguese at <http://www.cetesb.sp.gov.br>), 2004.*

- [9] 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.
- [10] Eppley Laboratory, INC. *Instrumentation for the Measurement of the Components of Solar and Terrestrial Radiation.*
- [11] 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.
- [12] GARRAT, J. *Clear-Sky Longwave Irradiance at the Earth's Surface - Evaluation of Climate Models American Meteorological Society* **14**: 1647-1670, 2001.
- [13] 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.
- [14] 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
- [15] KOVÁCS, Z.L. *Redes neurais artificiais - Fundamentos & aplicações. Livraria da Física, 4 Ed., São Paulo, 2006.*
- [16] 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.
- [17] LIOU, K. N. *An Introduction to Atmospheric Radiation. Academic Press, 2nd. Ed., San Diego California, 2002.*
- [18] NIEMELÄ, N., RÄISÄNEN, P., SAVIJÄRVI, H. *Comparison of surface radiative flux parameterizations Part I: Longwave radiation. Atmos. Res.* **58**: 1-18, 2001.
- [19] MLAKAR, P. e BOZNAR, M. *Perceptron neural network-based model predicts air pollution. In: Proceedings of Intelligent Information Systems IIS'97, Ed. H. Adeli. Grand Bahama Island, Bahamas, IEEE Computer society, 345-349, 1997.*

- [20] *Neuroshell 2, 1993: Users manual, Ward Systems Group Inc., Frederick, Maryland, 254 pp.*
- [21] 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.*
- [22] 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.*
- [23] 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.*
- [24] 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.*
- [25] 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.*
- [26] OLIVEIRA, A.P., SOARES, J., BOZNAR, 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.*
- [27] 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.*
- [28] SANCHEZ-CCOYLLO, O. R., DIAS, P.L.S., ANDRADE, M.F. e FREITAS, S. R. *Determination of O₃, CO and PM₁₀ transport in the metropolitan area of São Paulo, Brazil through synoptic-scale analysis of back trajectories. Meteorol Atmos. Phys. 92: 83-93, 2006.*

- [29] TORRES, O., BHARTIA, P.K., HERMAN, J.R., AHMAD, Z., e GLEASON, J. *Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis. Journal of Geophysical Research*, **103**, 17099-17110, 1998.
- [30] WILKS D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press - International Geophysics Series 2nd. Ed., 2006.*
- [31] WILLMOTT, C.J. *On the validation of models. Physic Geogr.* **2**: 184-94, 1981.
- [32] http://eosweb.larc.nasa.gov/GUIDE/dataset_documents/srb.html