



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
PRO - REITORIA DE PÓS - GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

**ESTUDO DA VARIAÇÃO NA ALTITUDE DE MÁXIMA
OCORRÊNCIA DE METEOROS E A SUA RELAÇÃO COM
O CICLO SOLAR**

SEBASTIÃO NASCIMENTO DE SOUZA

CAMPINA GRANDE-PB

2015

SEBASTIÃO NASCIMENTO DE SOUZA

**ESTUDO DA VARIAÇÃO NA ALTITUDE DE MÁXIMA
OCORRÊNCIA DE METEOROS E A SUA RELAÇÃO COM
O CICLO SOLAR**

Dissertação apresentada ao Mestrado de
Ciência e Tecnologia Ambiental da
Universidade Estadual da Paraíba, em
cumprimento às exigências parciais para
obtenção do título de mestre em Ciência
e Tecnologia Ambiental.

ORIENTADOR: Dr. Lourivaldo Mota Lima

CAMPINA GRANDE

2015

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

S719e Souza, Sebastião Nascimento de.
Estudo da variação na altitude de máxima ocorrência de meteoros e a sua relação com o ciclo solar [manuscrito] / Sebastião Nascimento de Souza. - 2015.
51 p. : il. color.

Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.
"Orientação: Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, Departamento de Física".

1. Alturas dos meteoros. 2. Fluxo solar. 3. Ciclo solar 23. I.
Título.

21. ed. CDD 551.5

SEBASTIÃO NASCIMENTO DE SOUZA

**ESTUDO DA VARIAÇÃO NA ALTITUDE DE MÁXIMA
OCORRÊNCIA DE METEOROS E A SUA RELAÇÃO COM O
CICLO SOLAR**

Dissertação apresentada ao Mestrado de Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências parciais para obtenção do título de mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Aprovado em 29/05/2015

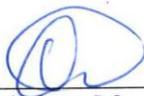
BANCA EXAMINADORA



Dr Lourivaldo Mota Lima
(Orientador – Universidade Estadual da Paraíba – UEPB)



Dr Edvaldo de Oliveira Alves
(Examinador Interno – Universidade Estadual da Paraíba – UEPB)



Dr Cristiano Max Wrasse
(Examinador Externo – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE)

**CAMPINA GRANDE
2015**

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que
ninguém viu, mas pensar o que ninguém
ainda pensou sobre aquilo que todo mudo vê”.*

*Aos meus pais que, mesmo com pouca escolaridade,
sempre me incentivaram a prosseguir com os estudos,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me concebido a oportunidade de chegar até aqui e superar os desafios. Obrigado Senhor!

Ao meu orientador professor Dr. Lourivaldo Mota Lima pela dedicação, humildade e compreensão. Saiba que o tema sugerido para este trabalho de mestrado despertou-me muita curiosidade e vontade de aprender algo novo.

Aos meus pais, exemplos de perseverança e honestidade, virtudes que me levaram a estruturar minha história de vida.

À minha amiga Juliana Cardoso Herculano, pela ajuda nos momentos de dificuldades e apoio constante.

À minha amiga Karla Cristina Avelino, pelo incentivo na realização desse curso.

À Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), aos seus professores e funcionários pelos serviços prestados.

Agradeço aos colegas e amigos da turma de Mestrado 2013.2 do MCTA, pelo significado dos nossos encontros, debates, estudos, anseios e descobertas.

Aos professores Edvaldo de Oliveira Alves e José Fidelis Filho pelas contribuições durante a participação na banca de Qualificação do Mestrado.

Aos que compõem o grupo de pesquisa Física da Atmosfera, pela convivência saudável e incentivadora. Em especial a Ana Roberta e Tarsus Sabino.

Ao secretário do MCTA, Josemberg Nascimento Moura, pelo compromisso e dedicação ao trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela disponibilização dos dados por radar meteórico em Cachoeira Paulista-SP.

Aos amigos Erasnilson Vieira Camilo e Vitória de Andrade Freire pelas contribuições durante a finalização desse trabalho.

RESUMO

Neste trabalho, dados das alturas de máxima ocorrência de ecos meteóricos foram usados para investigar uma possível relação entre as variações na altura dos meteoros e fluxo solar em baixas latitudes, durante o ciclo solar 23. As alturas dos meteoros foram obtidos a partir das medidas por radar meteórico SKiYMET em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45,0°O). Os dados utilizados incluem as medidas realizadas de março de 1999 a julho de 2006 e de setembro de 2007 a outubro de 2008. O alcance do eco e o ângulo zenital referente a cada eco do radar são usados para obter as alturas de ocorrência dos meteoros. A altura de máxima ocorrência diária foi obtida a partir da distribuição vertical através de ajuste Gaussiano. A série de dados da altura do pico de ocorrência de meteoros foi submetida a análise de regressão linear múltipla para investigar a tendência e possíveis variações induzidas pela atividade solar. Os resultados indicam uma tendência de queda de aproximadamente 68 m/ano na altura de ocorrência máxima dos meteoros e de 447 m/100sfu utilizando os dados mensais após remoção do efeito solar, acarretando numa diminuição da altura do pico de aproximadamente 248 m para todo o período observado após remoção da tendência do tempo. Considerando apenas o período de declínio do ciclo solar (de 2002 a 2008) a queda foi de aproximadamente 1054 m utilizando nas análises os dados mensais. O decréscimo da altura de ocorrência dos meteoros pode ser atribuído, em parte, a efeitos da atividade solar. Sabendo que a atmosfera se expande com o crescimento da atividade solar a densidade neutra apresenta uma tendência decrescente ao longo do tempo.

Palavras-chave: alturas dos meteoros, fluxo solar, ciclo solar 23.

ABSTRACT

In this paper, data from the heights of maximum occurrence of meteor echoes were used to investigate a possible relationship between variations in the height of meteors and solar flux at low latitudes during the solar cycle 23. The heights of meteors were obtained from measurements by SKiYMET meteor radar system at Cachoeira Paulista (22.7 ° S, 45.0 ° W). The data used include measurements taken from March 1999 to July 2006 and from September 2007 to October 2008. The echo of the reach and the zenith angle with respect to each radar echo are used for the heights of occurrence of meteors. The maximum height of daily occurrence was obtained from the Gaussian distribution through vertical adjustment. The series of height data of peak occurrence of meteors was subjected to multiple linear regression analysis to investigate the trend and possible variations induced by solar activity. The results showed a downward trend of approximately 68 m / year at the time of maximum occurrence of meteor and 447 m / 100sfu using monthly data after removal of the solar effect, resulting in a decrease in the peak height of approximately 248 m for all observation period after the time trend removal. Considering only the period of decline of the solar cycle (2002-2008) the decline was approximately 1054 m using monthly data in the analysis. The decrease of the meteors occurrence height can be attributed, in part, the effects of solar activity. Knowing that the atmosphere expands with the growth of solar activity the neutral density shows a downward trend over time.

Keywords: heights of meteors, solar flux, solar cycle 23.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo Geral	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. CONHECIMENTOS BÁSICOS	15
3.1. A atmosfera terrestre	15
3.2. Meteoróides, meteoros e meteorito	17
3.2.1. Trilhas de Meteoros	18
3.3. Os ciclos solares	19
3.3.1. O ciclo solar 23	20
3.4. A influência solar na atmosfera terrestre	21
3.5. Alterações periódicas e não periódicas na atmosfera	22
3.5.1. Variações de longo prazo nos parâmetros atmosféricos	23
3.5.2. Causas das alterações das alturas dos meteoros	24
4. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	26
4.1. Dados e métodos de análises	26
4.2. Radar meteórico	26
4.2.1. Radar SKiYMET	27
4.2.2. Localização do eco no céu	29
4.2.3. Tempo de decaimento	30
4.2.4. Período e qualidade do sinal	30
4.3. Estimativa da altura do pico	31
4.4. Uso do índice solar F10.7 cm	31
4.4.1. Correlação múltipla	31
4.5. Dessazonalização de dados	32
4.6. Correlação cruzada	32
4.7. Análise de regressão linear múltipla	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
6. CONCLUSÕES	44
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Perfil vertical da temperatura média anual do modelo CIRA-86 para 5°S e do ozônio obtido por radiossondagem em San Cristobal em 28 de dezembro de 2000. 16
- Figura 2 - Localização geográfica da observação do radar em Cachoeira Paulista-SP.. 26
- Figura 3 - Configuração da detecção de uma trilha meteórica por um radar de retroespalhamento. O Alcance (R) do radar se relaciona com a elevação (E) e a altura (h) da trilha de meteoro conforme a equação: $h = R \text{ sen}E$ 27
- Figura 4 - Ilustração do princípio de funcionamento do radar meteórico SKiYMET, utilizando rastros meteóricos para determinar parâmetros mesosféricos. 29
- Figura 5 - Valores diários (a) da altura de máxima ocorrência de meteoros sobre C. Paulista (gráfico superior) e (b) do fluxo solar em 10,7 cm (gráfico inferior). A média móvel de 30 dias também são representados (em azul)..... 34
- Figura 6 - Valores médios mensais da altura de máxima ocorrência de meteoros (superior) em Cachoeira Paulista e as respectivas médias mensais dessazonalizadas (inferior). Nos gráficos também estão representados os desvios-padrão (barras de erro) e o ajuste linear (linha vermelha). 35
- Figura 7 - Dispersão entre as médias mensais das alturas de máxima ocorrência de meteoros e o índice solar F10,7, para os dados originais (esquerda) e dessazonalizados (direita), juntamente com os ajustes linear (azul) e polinomial de segunda ordem (vermelho). 36
- Figura 8 - Altura média mensal dessazonalizada de meteoros de pico (preto) e seus valores após eliminação da atividade solar da parte induzida (vermelho), juntamente com ajuste linear (tracejada linha azul), por intervalo de tempo 1999-2008. 39
- Figura 9 - Altura média anual de máxima ocorrência de meteoros (preto) e os respectivos valores após a eliminação da tendência (vermelho) em função do fluxo solar. A linha pontilhada representa o ajuste linear..... 39
- Figura 10 - Altura média anual normalizada de meteoros de pico e os respectivos valores do fluxo solar F10,7 normalizado (vermelho), por intervalo de tempo 1999-2008. 40
- Figura 11 - Altura média anual dessazonalizada de meteoros de pico (preto) e seus valores após eliminação da atividade solar da parte induzida (vermelho), juntamente

com ajuste linear (tracejada linha azul), por intervalo de tempo 1999-2008. 41

Figura 12 - Altura média anual dessazonalizada de máxima ocorrência de meteoros (preto) e os respectivos valores após a eliminação da tendência em função do fluxo solar. A linha pontilhada representa o ajuste linear. 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação cruzada entre médias mensais das alturas de máxima ocorrência de meteoros e o tempo (meses) e o índice F10,7..... 37

Tabela 2 - Coeficientes de Spearman entre médias mensais das alturas de máxima ocorrência de meteoros e o tempo (meses) e o índice F10,7 e os respectivos valores das melhores correlações cruzadas. 38

Tabela 3 – Redução das alturas de máxima ocorrência de meteoros em diferentes análises. 43

1. INTRODUÇÃO

Através de medidas de parâmetros obtidas a partir de instrumentos na superfície terrestre e a bordo de satélites, como a temperatura, densidade, pressão, ventos, etc., é possível realizar estudos relacionados com as mudanças climáticas. No entanto, investigações sobre o comportamento da média e alta atmosfera podem ser usadas para melhor compreender as variações climáticas. Um exemplo disso é o esfriamento da estratosfera e da mesosfera, em que alguns estudos indicam que a causa é o aumento dos gases estufa (Beig, 2011).

A região de transição entre a média atmosfera e a termosfera é conhecida como alta mesosfera e baixa termosfera (Mesosphere and Lower Thermosphere – MLT region). Esta região apresenta uma série de processos, tais como a temperatura mínima da atmosfera, a ocorrência de meteoros, nuvens noctilucetas, os quais não são observados em outras camadas da atmosfera e, portanto, muitas vezes a mesma é tratada separadamente (Jacobi, 1998; Tao, 2010).

As regiões da atmosfera compõem um sistema acoplado em que, às vezes, os fenômenos que acontecem em uma determinada camada em torno de uma altitude, podem afetar outras camadas em altitudes distintas. A região da mesosfera superior e da porção inferior da termosfera, localizada entre aproximadamente 60 e 100 km de altitude, desempenha um papel importante no acoplamento vertical, uma vez que processos físicos de filtragem e modulação de ondas atmosféricas, que se propagam ascendentemente a partir das camadas mais baixas da atmosfera até a termosfera, são capazes de indicar que pequenas variações induzidas pela forçante solar podem gerar respostas significativas na porção superior da atmosfera (Lima et al., 2012).

O comportamento dos parâmetros atmosféricos da porção superior pode ser influenciado por variações de longo período no clima devido à ação humana e devido ao ciclo solar de aproximadamente 11 anos (Balachandran e Rind, 1995; Arnold e Robinson, 1998). Resultados de alguns estudos experimentais apontam que além da variabilidade interanual, também existem variações na escala decenal, que por sua vez podem incluir a influência do ciclo solar (Namboothiri et al., 1994; Merzlyakov e Portnyagin, 1999; Jacobi et al., 2001; Keuer et al., 2007).

Vários artigos de periódicos especializados (ex., Fraser, 1990; Namboothiri et al., 1994; Jacobi et al., 1997; Jacobi, 1998; Middleton et al., 2002; Baumgaertner et al., 2005) indicam a relação entre a influência da atividade solar com o comportamento de parâmetros atmosféricos.

O estudo do clima além de contribuir para o desenvolvimento do campo da climatologia, também pode trazer soluções para os problemas ambientais em todo planeta. A compreensão das interações Terra-Sol-Atmosfera permite o entendimento de como funciona o planeta Terra (Leite, 2012).

As medidas obtidas por radar meteórico em 23° S têm proporcionado observações de parâmetros mesosféricos, como os ventos, velocidade dos meteoros, temperatura, na região tropical do hemisfério sul, estabelecendo assim um grande potencial para o desenvolvimento de pesquisas que envolvam a distribuição vertical da ocorrência de meteoros bem como a temperatura em torno de 90 km de altitude.

Meteoro é o fenômeno luminoso que é criado ao longo do caminho dos meteoróides quando os mesmos entram na atmosfera e rapidamente vaporizam. Essas trilhas meteóricas podem refletir ondas de rádio e constituem um excelente traçador para estudar a dinâmica da região da alta mesosfera e baixa termosfera. As medições realizadas por radar meteórico permitem estimar uma série de parâmetros atmosféricos e astronômicos, como ventos neutros, coeficiente de difusão ambipolar, temperatura e densidade da atmosfera superior, localização do meteoro no céu, velocidade de entrada de meteoros na atmosfera, e fluxos de meteoros (Hocking et al., 2001).

Ao ingressarem na atmosfera terrestre, os meteoróides formam trilhas de elétrons livres. Após sua formação, a trilha ionizada rapidamente se expande, devido à difusão ambipolar, o qual depende da temperatura e da densidade do ambiente atmosférico. Uma vez que a ablação dos meteoróides é determinada pela densidade do meio, a altura média em que os meteoros ocorrem pode ser usada para investigar possíveis efeitos da variabilidade solar na região da alta mesosfera e baixa termosfera usando medidas obtidas por radar meteórico. Por outro lado, o tempo de decaimento dos ecos meteóricos tem sido utilizado na estimativa da temperatura média da alta mesosfera.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho foi investigar a relação entre as variações das alturas de ocorrência dos meteoros e o fluxo solar, ao longo do ciclo solar 23, a partir de medidas obtidas por radar meteórico no hemisfério sul.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar possíveis efeitos da variabilidade solar na dinâmica da região MLT;
- Analisar as correlações entre as alturas de pico dos meteoros com o tempo e com o fluxo solar;
- Encontrar uma possível tendência de longo prazo e efeitos da atividade solar na altura de máxima ocorrência de meteoros;
- Identificar as causas para a variação de longo prazo relacionada com a atividade solar.

3. CONHECIMENTOS BÁSICOS

3.1. A atmosfera terrestre

De acordo com a variação vertical da temperatura, a atmosfera terrestre é dividida em cinco camadas principais que são: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera. As camadas ionosféricas se estendem de 50 a 2000 km de altitude e são chamadas de D, E, F1 e F2 (Tao, 2010). As camadas da baixa e média atmosfera se relacionam através da propagação de ondas e interação do fluxo na estratosfera e mesosfera (Kurschner e Jacobi; 2003). Cada camada tem a sua importância e suas características diferenciadas. As propriedades físicas em função da altura são responsáveis pelas características da estrutura vertical da atmosfera.

A estratosfera equivale à média atmosfera e situa-se na faixa entre aproximadamente 10 e 50 km de altitude. Essa região possui relação com as mudanças climáticas. Os processos ocorridos na superfície terrestre geram perturbações que modulam a dinâmica das demais camadas atmosféricas. Os movimentos ondulatórios compreendem uma das propriedades mais importantes da atmosfera, do ponto de vista dinâmico. Algumas características das camadas:

Troposfera – A principal característica dessa camada é a queda de temperatura à medida que a altitude aumenta. É nessa camada em que vivemos. Nela ocorrem as chuvas, nuvens e relâmpagos. É a região mais baixa da atmosfera terrestre. Possui 75% da massa atmosférica. Em média, a espessura dessa camada é de 12 km mas esse valor é alterado nos polos chegando a 17 km. A razão para a redução de temperatura é que a absorção da radiação solar ocorre na superfície, aquecendo as porções mais baixas da troposfera.

Estratosfera – Localiza-se após a troposfera. Nesta camada há uma grande variação de temperatura e é nela que se encontra a camada de ozônio. Nela à medida que a altitude aumenta a temperatura também aumenta. Nessa camada as moléculas de ozônio são formadas e destruídas em reações não catalíticas na estratosfera. Acima da estratosfera as moléculas de O₂ são decompostas pela radiação ultravioleta do Sol. Isso ocorre pois o ar nessa região é muito rarefeito. Parte dos átomos são recombinados e formam moléculas diatômicas, em que algumas podem novamente sofrer o processo de

fotodecomposição. Como na estratosfera o ar é mais denso, o número de moléculas de O_2 é maior. Dessa forma, essas moléculas ao colidirem com átomos de oxigênio formarão O_3 . Essas áreas são exotérmicas, ou seja, liberam calor, com isso, justifica o perfil de temperatura desta camada da atmosfera (Mozeto, 2001).

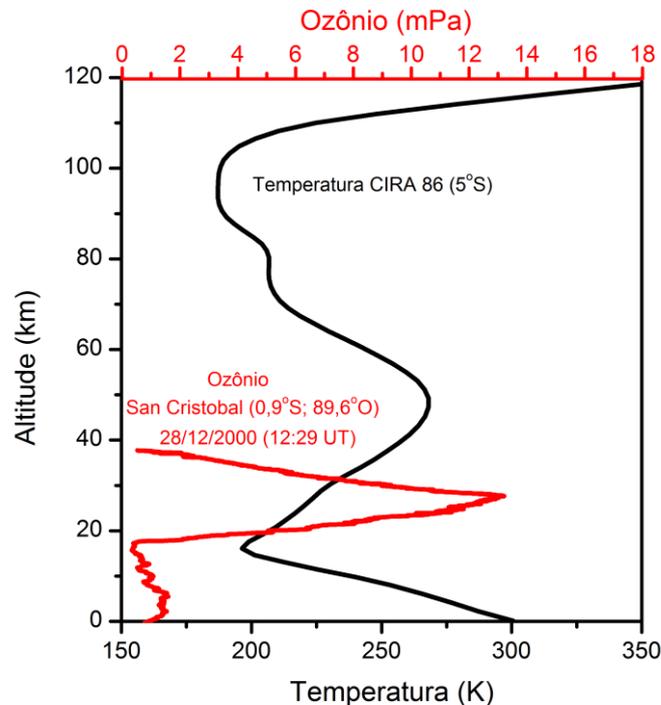


Figura 1 – Perfil vertical da temperatura média anual do modelo CIRA-86 para 5°S e do ozônio obtido por radiossondagem em San Cristobal em 28 de dezembro de 2000.

Mesosfera – Nesta camada a temperatura cai e o ar quase não possui vapor de água. É na mesosfera que ocorre uma nítida redução da temperatura chegando até a $-90^{\circ}C$. É nessa camada que ocorrem os fenômenos da aeroluminescência e da ablação dos meteoroides. A temperatura é extremamente baixa, pois não há gases ou nuvens capazes de absorver a energia solar.

Termosfera – Acima da mesosfera encontra-se a termosfera. Inicia em torno de aproximadamente 100 km e estende-se até aproximadamente 1000 km. A temperatura aumenta com a altitude. Nessa região a densidade das moléculas é tão pequena que raramente se chocam. É uma camada que atinge altas temperaturas, pois nela há oxigênio atômico, gás que absorve a energia solar em grande quantidade. As temperaturas na termosfera podem atingir até os $1000^{\circ}C$.

De acordo com a composição química do ar, a atmosfera pode ser dividida em homosfera, heterosfera e exosfera. A homosfera se estende desde a superfície até 100 km de altitude. Nessa camada a composição dos gases é constante e regular. Essa composição uniforme não deve ser confundida com as distribuições de espécies de como vapor de água e ozônio. A partir de 100 até 500 km de altitude tem-se a heterosfera. Nessa região a composição não é constante e é formada principalmente por oxigênio, hélio e hidrogênio e a sua composição muda com a altitude. A separação por difusão predomina é o principal responsável para a estratificação dos constituintes nessa camada. Acima de 500 km encontra-se a exosfera, a qual é composta por hidrogênio e hélio (Salby, 1995).

As dificuldades de acesso às medidas é uma restrição para estudos da região da alta mesosfera e baixa termosfera. O interesse da compreensão dos processos dinâmicos e químicos na média e alta atmosfera aumentou depois que estudos mostraram que alterações nessas regiões estão relacionadas com o impacto da presença humana. Entre as causas estão a queima de combustíveis fósseis e emissões decorrentes das mudanças no uso da terra. Além disso, no Hemisfério Sul ainda são poucos os estudos que tratam do entendimento da região próxima a mesopausa equatorial e de baixas latitudes do Hemisfério Sul.

3.2. Meteoróides, meteoros e meteorito

O tamanho dos meteoroides é pequeno mas carrega uma grande quantidade de energia cinética. A energia cinética presente nos meteoroides é dissipada através da colisão com os átomos e moléculas da atmosfera. A colisão dos meteoroides com a atmosfera demora alguns décimos de segundo (Tao, 2010).

A história dos estudos dos meteoros é longa (Hocking et al., 2001; Tao, 2010). Foram feitos estudos sobre os meteoros tanto para conhecê-los melhor como para adquirir mais informações sobre o ambiente em que eles são formados. Em virtude da aposentadoria de alguns investigadores e também pelo fato dos avanços terem sido limitados através da tecnologia inadequada ocorreu uma redução da investigação dos meteoros na década de 1980 e início de 1990 (Hocking et al., 2001).

A maioria dos meteoróides são queimados na faixa de altitude entre 70 e 110 ou 120 km (Tao, 2010; Hocking et al.,2001). Quando o meteoróide colide com as partículas do ar atmosférico a energia cinética é convertida em calor, luz e ionização. A maioria dos meteoros não pertence a nenhuma chuva de meteoros reconhecida. A quantidade de meteoros varia aproximadamente entre 100 e 500 meteoros por hora. O número máximo de meteoros ocorre por volta do amanhecer e o mínimo depois do crepúsculo. A órbita da Terra em torno do Sol e a diferença de latitude provocam uma forte variação sazonal dos meteoros (Tao, 2010).

As alturas dos meteoros podem ser determinadas através do ângulo zenital dos meteoros e depende da frequência de operação do radar. A maioria dos meteoros ocorre entre 70 e 110 km de altura, com máximo em torno de 90 km, quando observados com radar de frequência de 32,55 MHz e em torno de 88 km para 53,5 MHz (Tao, 2010). A partir das observações dos meteoros é possível deduzir a velocidade de entrada e a velocidade de deriva da trilha meteórica através do deslocamento Doppler na frequência de operação do radar.

Nem sempre o meteoróide é completamente queimado, com isso, ocorre à formação do meteorito. Este equivale ao que restou de um meteoróide ao atingir a superfície terrestre.

Os meteoróides são originados dos cometas e da fragmentação de asteroides e vários parâmetros estão relacionados com a formação dos meteoros. De acordo com Santos (2010) a densidade, a velocidade geocêntrica, ângulo de incidência na atmosfera, seção de choque e composição química dos meteoróides são essenciais para a formação dos meteoros. A região onde inicia a ablação forma a maior parte da radiação emitida por um meteoro (Corrêa, 2003). É possível verificar a trilha de um meteoro visualmente ou por alguns tipos de técnicas instrumentais.

A ablação é um processo que causa a perda da massa do meteoróide através da colisão com partículas da atmosfera. No processo de ablação a massa do meteoróide é consumida. O contato dos meteoróides com a atmosfera terrestre é dividida em quatro fases, são elas: pré-aquecimento, ablação, obscurecimento e impacto (Corrêa, 2003).

3.2.1. Trilhas de Meteoros

Quando um corpo colide com a atmosfera terrestre em uma altitude de 300 a 100 km é provocado um pré-aquecimento em virtude do impacto com as moléculas do gás

na atmosfera. As trilhas de meteoros equivalem a um trem de átomos excitados e ionizados criado por cada meteoro. A largura da trilha inicial dos meteoros é muito variável. As estimativas variam de dezenas de metros até alguns centímetros (Tao, 2010).

Meteoróides queimam na atmosfera em virtude do atrito. As trilhas ionizadas dos meteoros podem ser detectadas por um radar. Este transmite pulsos de ondas de rádio que são refletidas dentro da trilha de plasma: na trilha chega o campo elétrico das ondas, com isso, fazem as partículas vibrarem e oscilarem, e, dessa forma, emitirem ondas eletromagnéticas. Logo após, as partículas da trilha meteórica absorve parte da energia das ondas emitidas pelo radar. Em seguida, essa energia é reemitida em todas as direções, possibilitando serem detectadas pelas antenas receptoras do sistema (Araújo, 2012). Os tipos de trilhas de meteoros são caracterizados através das suas linhas de densidade de elétrons. Há dois tipos de trilhas de meteoros: subdensa e sobredensa (Tao, 2010).

Através das medições de radar foi possível investigar as características das trilhas de meteoros e a região que fica em torno das trilhas (Tao, 2010).

3.3. Os ciclos solares

O ciclo solar mostra as atividades solares em um determinado período. Nesta pesquisa o estudo foi feito com as periodicidades de aproximadamente 11 anos levando-se em consideração o fluxo de rádio solar no comprimento de onda 10,7 cm (frequência de 2800 MHz) o qual é um excelente indicador da atividade solar.

Os ciclos solares podem diferir um do outro. A frequência de intervalo entre os ciclos de 11 anos variam de 9 anos (para o ciclo 2) até 13,67 anos (para o ciclo 4). Em média, um ciclo solar dura 11,1 anos. Possui uma fase ascendente que dura entre 4 e 4,5 anos e uma fase descendente com duração entre 5 e 6,5 anos (Almeida, 2001). O ciclo solar 23 registrou um período de 13,58 anos (Agee et al., 2010), tendo um mínimo solar longo e bastante calmo. Devido a este solar mínimo, a alta atmosfera foi levada a reações extremas, como o decréscimo da densidade na termosfera (Emmert et al., 2010; Solomon et al., 2010) a qual excedeu as expectativas que tinham como base os índices convencionais de atividade solar, como é o caso do número de manchas solares ou o fluxo solar na faixa de 10,7 cm ($F_{10,7}$).

O campo magnético muda de polaridade a cada 11 anos, por isso, o ciclo solar magnético dura 22 anos.

O ciclo solar é determinado pela quantidade de manchas solares. Em um novo ciclo as manchas solares aparecem em latitudes de 20° - 25° tanto no hemisfério norte como no sul. Os períodos de máxima e mínima atividade solar são determinadas, respectivamente, pela maior e menor quantidade de manchas solares (Almeida, 2001).

A interação Sol-Terra não é definida pela quantidade de manchas solares, no entanto, esse parâmetro revela o nível de radiação e de partículas emitidas durante um determinado tempo.

Além do ciclo solar de 11 anos também há o ciclo de aproximadamente 77 anos e de 100 anos (Almeida, 2001). Há muitas décadas os parâmetros climáticos vem sendo associado aos ciclos de 11 e 22 anos. Além da variabilidade de 11 anos também há periodicidades em 28, 24, 19, 16 e 13 anos. As periodicidades de várias décadas, apesar da grande importância, são muito difíceis de serem estudadas (Moussas et al., 2005).

3.3.1. O ciclo solar 23

O ciclo solar 23 não se comportou como havia sido previsto. Foi um ciclo mais fraco do ponto de vista magnético e mais simples do que seus dois antecessores. O mesmo atingiu o seu máximo durante os anos 2000-2002 (Chapman et al., 2010).

O ciclo solar 23 é considerado anômalo pois viola a regra par-ímpar mantida por 150 anos no registro de manchas solares de Zúrique. Esta regra determina que em um ciclo solar ímpar o número médio de manchas solares é maior do que seu ciclo anterior de número par. A violação da regra par-ímpar para os ciclos 22 e 23 foi prevista em 1955 (Chapman et al., 2010).

Dois grandes grupos de manchas solares no ciclo 23 equivalem as grandes regiões ativas em setembro de 2000 e março de 2001. A atividade solar foi bastante reduzida entre outubro de 2000 e março de 2001. Ele foi mais fraco do que o ciclo 22, não apenas no fluxo magnético, mas na maioria dos índices de atividade solar (Chapman et al., 2010).

O número de manchas solares registradas em meados de 2008 foi bem abaixo do normal. O mínimo de manchas solares é notável não apenas por causa do baixo nível de atividade, mas também porque os campos magnéticos nos polos foram cerca de 40% mais fracos do que os três mínimos anteriores. Os campos magnéticos polares invertem

seu sinal rapidamente no máximo de manchas solares. A maior força devida a campos magnéticos polares ocorrem durante a fase de declínio do ciclo (Wang et al., 2009). O desenvolvimento da força devida ao campo magnético polar ao longo de um ciclo solar pode ser usado para prever a magnitude do próximo ciclo e o pico do ciclo atual.

A intensidade do campo polar, no final, de um dado ciclo depende de vários fatores. São eles: a atividade do campo polar inicial; a quantidade total de fluxo magnético que emerge sob a forma de regiões ativas durante o ciclo; as inclinações axiais e latitudinais das regiões magnéticas bipolares; a taxa de difusão supergranular; a velocidade do fluxo meridional e a variação da latitude com o tempo (Wang et al., 2009).

Os fluxos são mais lentos em latitudes médias próximos ao máximo das manchas solares, quando suas inclinações também estão mais íngremes perto do equador (Wang et al., 2009).

Buracos coronais localizados em latitudes mais baixas tendem a ter a mesma polaridade do campo polar em seu próprio hemisfério. Em suas pesquisas Wang et al. (2009) verificaram o motivo dos campos polares serem tão fracos durante o mínimo solar, simulando a evolução nos últimos quatro ciclos solares. Nos ciclos de grandes amplitudes geralmente são necessárias maiores velocidades de fluxo comparados aos de pequena amplitude. Entretanto, esses autores perceberam que as maiores velocidades de fluxo foram atribuídas a ciclos longos em que os totais de manchas solares são comparáveis aos de grandes amplitudes em ciclos curtos.

De 2007 a 2009 a atividade solar foi muito baixa. Os níveis de irradiância ultravioleta foram mais baixos do que o mínimo solar anterior. Solomon et al. (2010) verificaram que as variações nos níveis de dióxido de carbono e outros gases interferiram no clima da termosfera. A queda da densidade na termosfera foi atribuída a redução do nível de irradiação solar ultravioleta.

3.4. A influência solar na atmosfera terrestre

O Sol fornece toda a energia da Terra, regulando, em parte, a quantidade de luz, o aquecimento, o dia e a noite, bem como as estações do ano. Os estudos sobre a variabilidade solar são importantes uma vez que fornecem subsídios para planejamento e as tomadas de decisões políticas relacionadas ao futuro do planeta.

Almeida (2001) investigou as correlações da atividade solar com o clima em regiões de baixas latitudes da América do Sul. A teoria meteorológica clássica considera que os processos atmosféricos são independentes das condições do meio interplanetário.

Os vários processos que ocorrem no Sol devido aos diferentes graus de atividade se propagam através do meio interplanetário e produzem perturbações as quais podem ser detectadas na magnetosfera, na ionosfera e até mesmo na superfície terrestre. Labitzke e van Loon (1988) sugeriram uma associação entre o ciclo solar de 11 anos e parâmetros estratosféricos, como a altura geopotencial e a temperatura.

O aquecimento da região MLT ocorre principalmente devido a absorção de radiação solar pelo oxigênio molecular, ozônio e dióxido de carbono, enquanto que o resfriamento é devido ao óxido nítrico, ozônio e dióxido de carbono, vapor de água e emissão infravermelha de oxigênio (Beig, 2011). Pertsev e Perminov (2008) encontraram uma significativa resposta das hidroxilas e de emissão de oxigênio molecular para as intensidades da atividade solar, o que parece ser implementada através do crescimento relevante de oxigênio atômico nas alturas da baixa termosfera e mesopausa (80-100 km), devido à dissociação do oxigênio molecular na região de absorção espectral Schumann-Runge (Brasseur e Solomon, 1984).

3.5. Alterações periódicas e não periódicas na atmosfera

A radiação emitida pelo Sol apresenta variações em uma ampla gama de escalas de tempo e reflete a emissão de radiação não homogênea devido à presença ou ausência de zonas ativas no disco solar. A radiação solar é um importante parâmetro que afeta o clima da Terra e sua variabilidade, em alguma região do espectro, tem sido enfatizada devido a sua importância para a dinâmica atmosférica. Por exemplo, a irradiação solar total varia de cerca de 0,1% (e. g., Baldwin e Dunkerton, 2005) entre os máximos e mínimos solares sobre a atividade do ciclo solar de 11 anos, enquanto que a radiação solar ultravioleta (UV) varia de 6-8% ou mais (por exemplo, Lean et al., 1997). Variações no ultravioleta e alterações solares-induzida no ozônio podem ter um efeito radioativo forçado no clima através de uma resposta dinâmica da energia solar no aquecimento na base da estratosfera (Haigh, 2003).

Os distúrbios produzidos por processos de atividade solar podem ser detectados por parâmetros da atmosfera neutra e ionizada. Correlações entre a altura geopotencial em 30 hPa, bem como a temperatura da baixa estratosfera, nas latitudes médias do

Hemisfério Norte (HN) e o ciclo solar foram sugeridas por Labitzke e Van Loon (1992). As mudanças nas reflexões absolutas ionosféricas e as observações de vento no Hemisfério Norte foram analisados para investigar as variações induzidas por atividade solar e tendências de longo prazo nas regiões da ionosfera (Jacobi e Kürschner, 2006) e mesosfera (Keuer et al, 2007; Jacobi et al, 2008). Jacobi et al. (2011) estudaram os parâmetros da mesosfera e baixa termosfera (MLT), durante o ciclo solar 23 e encontraram uma diminuição da densidade termosférica, que foi acompanhada por um aumento das amplitudes das ondas de gravidade na parte superior da mesosfera e uma diminuição na termosfera inferior.

Alguns estudos indicam que o período relevante é interanual e outros interdecadal. Porém, é necessário séries longas para investigar as periodicidades (Kürschner e Jacobi; 2003). Alguns autores afirmam que estudos envolvendo ventos e marés, apesar de possuírem um acordo geral nas análises dos dados, podem diferir quando mostrado em detalhes. Kürschner e Jacobi (2003) analisaram os parâmetros do vento através dos dados dos anos de 1973 a 2000. Medidas de vento sobre Obninsk e Colln foram feitas durante as quatro estações do ano e foram realizadas as comparações da variabilidade interanual desses parâmetros.

Tao (2010) mostrou a relação existente entre a expansão das trilhas de meteoros com o efeito da variação da densidade de elétrons na atmosfera. Em suas análises ele mostra que a variabilidade interanual pode está relacionada às grandes amplitudes do ciclo anual e também aos períodos finais da primavera e outono.

Os elétrons na ionosfera aumentam em quantidade no decorrer do ciclo solar e, com isso, os níveis constantes de densidade de elétrons são encontrados em alturas mais baixas (Kürschner e Jacobi; 2003). Existe uma variabilidade decenal (decadal) nas séries temporais. Isso ocorre devido a variação de ionização entre o mínimo e máximo solar. Como a ionização se encontra mais forte nos intervalos de alta atividade solar as alturas de reflexão das ondas são mais baixas durante o máximo solar.

3.5.1. Variações de longo prazo nos parâmetros atmosféricos

Alguns artigos evidenciam a análise de alterações em parâmetros atmosféricos a longo prazo (Bremer, 2008; Jacobi et al., 2005; Bremer e Peters; 2008).

Bremer (2008) analisou parâmetros da região F1 da ionosfera. Nesta pesquisa a eliminação dos efeitos do ciclo solar e das influências geomagnéticas foram realizadas

para cada hora e para cada mês separadamente. O período de estudo analisado se estende de 1957 até 2005. Esse estudo mostrou que alterações no ozônio não interferem apenas na estratosfera mas, também, na mesosfera e baixa termosfera.

Dados de ventos dos anos de 1973 a 2000 foram analisados por Jacobi et al. (2005) com o propósito de investigar a variabilidade interanual de longo prazo nos ventos. Esse estudo indicou que a variabilidade interanual de longo prazo pode estar relacionada às grandes amplitudes do ciclo anual, bem como no final da primavera e/ou outono.

Bremer e Peters (2008) investigaram a influência das alterações do ozônio estratosférico sobre as tendências de longo prazo na baixa termosfera. Esse estudo mostrou, entre 1979 e 1995, um efeito combinado entre o aumento dos gases do efeito estufa e a diminuição da camada de ozônio. Esta pesquisa também apontou que durante os meses de inverno o ozônio estratosférico levou a mudanças significativas na temperatura.

3.5.2. Causas das alterações das alturas dos meteoros

A ocorrência dos fenômenos de meteoros depende das características de meteoróides (massa, densidade, entrada e velocidade). Além disso, as variações na densidade da atmosfera neutra e ionizante podem contribuir para alteração das alturas de ocorrência de meteoros. Bumba (1949) foi o primeiro a sugerir uma relação entre a variabilidade da frequência de meteoros e o ciclo solar. Lindblad (1976) analisou as taxas de meteoros e descobriu que a frequência dos ecos de meteoros varia inversamente com a atividade solar. Estes resultados foram confirmados por Ellyett (1977) e uma possível causa foi apontada como sendo devido a mudanças na densidade atmosférica nas alturas de ablação de meteoros (Ellyett e Kennewell, 1980). Recentemente, Jacobi et al. (2011) também encontraram que as alturas médias de meteoros medidos com o radar meteórico VHF diminuiu durante o mínimo solar.

Clemesha e Batista (2006) mostraram que existe uma relação entre as distribuições de altura de meteoros com variações na atmosfera. Foi verificado que há uma oscilação anual da densidade da atmosfera na região MLT, tanto no modelo CIRA como MSIS. Com esse estudo foi possível mostrar, em escalas de dias a anos, variações na distribuição da altura de meteoros. Variações de longo prazo na densidade atmosférica provocam tais variações nas alturas de ocorrência dos meteoros.

As alturas absolutas da reflexão das ondas de baixa frequência pela ionosfera, medidas à noite, diminuem durante o máximo solar (Kurschner e Jacobi; 2003).

Quando uma onda de rádio incide sobre uma trilha de meteoros em um plano normal, uma parte da energia das ondas é espalhada ao longo da direção da qual ela veio. A difusão ambipolar determina principalmente a intensidade do eco para trilhas de meteoros próximos a mesopausa (Hocking et al., 1997).

Younger et al. (2009) realizaram um estudo em que consistia utilizar as taxas de contagem de meteoros com o objetivo de analisar a distribuição esporádica radiante. Além da variabilidade inter-anual e sazonal, a taxa de contagem de meteoros possui uma alta variação durante as horas do dia. O movimento da Terra é uma possibilidade da variabilidade sazonal das taxas de contagem dos meteoros. Os movimentos de Translação e Rotação da Terra causa tanto uma variação sazonal da taxa de contagem de meteoros como alteração na taxa de contagem de hora em hora.

4. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

4.1. Dados e métodos de análises

Nessa pesquisa foram utilizados dados da altura de ocorrência dos meteoros obtidos a partir das medidas realizadas pelo radar meteorológico VHF de Cachoeira Paulista (22,7°S; 45°O), no período compreendido entre março de 1999 a outubro de 2008. A localização geográfica do sítio de observação está representado na Figura 2.

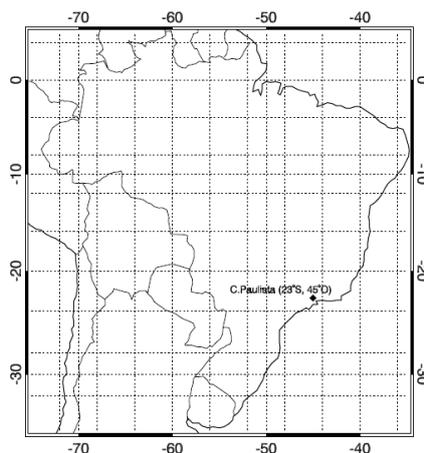


Figura 2 – Localização geográfica da observação do radar em Cachoeira Paulista-SP.

4.2. Radar meteorológico

O radar meteorológico é um instrumento eletrônico utilizado para medidas de parâmetros atmosféricos e astronômicos, tais como as marés atmosféricas, ventos na alta atmosfera e temperatura (Leite, 2012). Em 1925 esse instrumento foi a primeira ferramenta utilizada para estudar a atmosfera acima de 80 km. Esse dispositivo também permite a obtenção de outros parâmetros astronômicos como o fluxo de meteoros, velocidade de entrada dos meteoroides, etc. (Santos, 2010).

As técnicas observacionais de meteoros são usadas com o intuito de fornecer a maior quantidade de informações sobre os meteoros. Entre elas pode-se citar a orientação de suas trajetórias na atmosfera, distância, posição angular e velocidade, bem como a massa dos meteoróides que os originam. O radar pode identificar partículas com

massas tão pequenas (Santos, 2010) quanto 10^{-6} g. Essa massa é menor do que a massa dos meteoros (Corrêa, 2003).

Os radares são mais sensíveis com meteoros gerados em menores alturas. As maiores alturas de ablação de meteoros geram rastros de meteoros maiores do que em alturas mais baixas. Quando a escala da altura do meteoro é pequena a ablação do meteoro irá ocorrer em um caminho mais curto (Younger et al., 2009).

Na figura 3 pode-se observar a configuração da detecção de uma trilha meteórica por um radar de retroespalhamento.

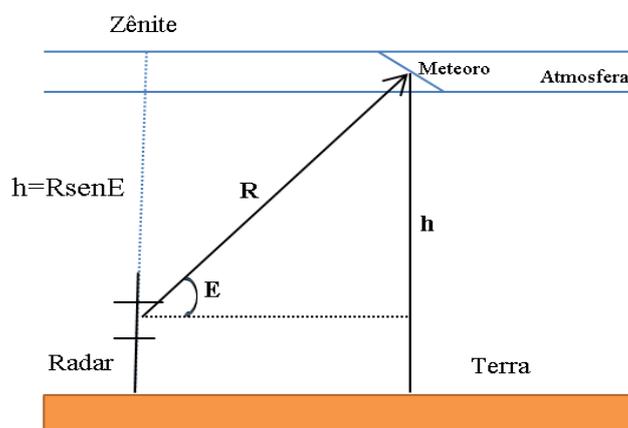


Figura 3 – Configuração da detecção de uma trilha meteórica por um radar de retroespalhamento. O Alcance (R) do radar se relaciona com a elevação (E) e a altura (h) da trilha de meteoro conforme a equação: $h = R \text{ sen}E$.

4.2.1. Radar SKiYMET

O sistema do radar SKiYMET (All-Sky Interferometric Meteor Radar) utiliza cálculos para a detecção e análise de eventos meteóricos (Alves, 2012). O radar transmite ondas eletromagnéticas e a reflexão é obtida através de partículas carregadas dentro da trilha de plasma (Araújo, 2012). Certa quantidade de energia que são liberadas pelo radar são detectadas pelas antenas receptoras do radar pois são absorvidas pelas partículas na trilha meteórica e reemitidas.

O radar SKiYMET é um instrumento que possui múltiplas finalidades. O sistema funciona com uma taxa de repetição de 2144 pulsos por segundo. Os sistemas do passado utilizavam apenas 600 pulsos por segundo. Esse radar permite a determinação de dados que antes não eram possíveis como, por exemplo, a velocidade

de entrada de meteoros. Requisitos especiais permitem discriminação detalhada do eco em tempo real através de um software, como também a determinação dos ventos da atmosfera média (Hocking et al., 2001).

O hardware do sistema é formado por antenas, cabos, um transmissor e um receptor. As antenas aplicam elementos Yagi para garantir sensibilidade aproximadamente uniforme (Tao, 2010). As antenas receptoras estão organizadas com forma de uma cruz assimétrica. E cada uma dessas antenas tem ligação com um receptor separado. Todo o sistema é impulsionado através de um sistema operacional que possui como meio um computador pessoal (Hocking et al., 2001).

O sistema utilizado é o UNIX que permite a ligação do sistema de modems e a Internet. Esse sistema torna possível, ao mesmo tempo, colocar os dados em uma base contínua e analisar os dados de entrada dos ecos meteóricos. Com isso é possível detectar milhares de ecos por dia e gravar informações para estudos posteriores. Os dados são utilizados para determinar altura, localização angular, tempo de vida e velocidade. A partir desses dados é possível determinar outros parâmetros, tais como, a temperatura e a pressão na região do meteoro (Hocking et al., 2001).

O programa utilizado é o SKiYcorr que possui duas funções. Primeiramente ele é utilizado para se ter certeza que os possíveis meteoros são realmente meteoros válidos. Em segundo lugar, ele determina a localização dos meteoros no céu. Esse programa utiliza os parâmetros que poderiam ter vindo dos meteoros e usa esses dados para que as possíveis alturas dos meteoros possam ser determinadas (Hocking et al., 2001).

Com o radar SKiYMET é possível a determinação dos locais de radiante dos meteoros quando muitos se originam de um ponto em comum, no entanto, não é possível determinar a radiante de qualquer meteoro individualmente. Quando um meteoro entra na atmosfera, é detectado pelo radar que encontra-se alinhado perpendicularmente a trilha de meteoros. No céu, encontra-se um grande círculo centrado em torno do radar (Hocking et al., 2001).

As diferenças de fases dos sinais recebidos pelas antenas receptoras são usadas para determinar a localização da trilha meteórica no céu e a configuração interferométrica reduz a ambiguidade no ângulo de chegada (Hocking et al., 2001). O sistema opera numa frequência de 35,24 MHz, transmitindo radiação com pulso de 13 μ s, proporcionando uma resolução de 2 km, numa taxa de repetição de 2144 pps (pulsos por segundo). O pico de potência transmitida é 12 kW.

O sistema foi projetado para operar automaticamente 24 horas por dia e a detecção do sinal meteórico é realizada através de processos sucessivos. A qualidade do sinal é determinada através de análise de coerência de fase.

Esse radar é utilizado em estudos da alta atmosfera como o comportamento dos ventos meteóricos, atividades de ondas de escala global e a determinação da temperatura mesosférica (Leite, 2012).

Na figura 4 encontra-se a ilustração do princípio de funcionamento do radar meteórico SKiYMET.

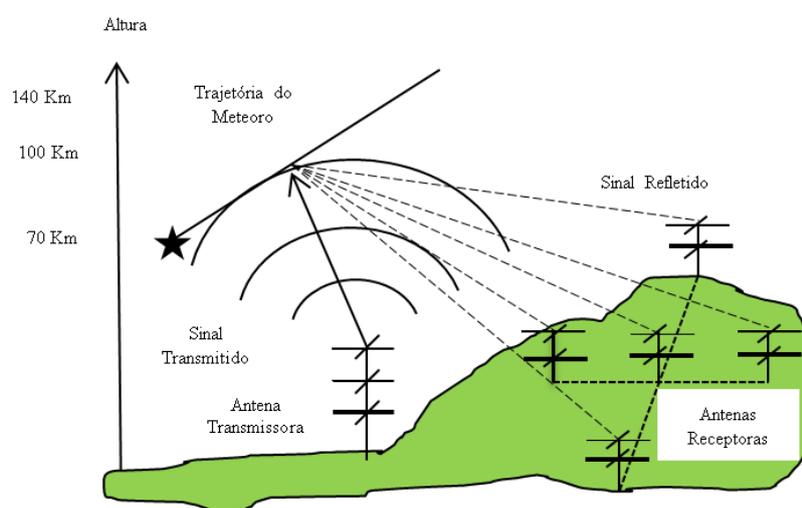


Figura 4 – Ilustração do princípio de funcionamento do radar meteórico SKiYMET, utilizando rastros meteóricos para determinar parâmetros mesosféricos.

FONTE: Adaptado de Wrasse (2004), página 56.

4.2.2. Localização do eco no céu

A localização de cada meteoro no céu foi determinada a partir do ângulo de entrada do meteoróide, o qual é calculado a partir do atraso de fase dos sinais recebidos por diferentes antenas (Jones et al., 1998). A altura dos meteoros é determinada a partir das medidas do alcance do eco e do ângulo zenital (Hocking et al., 2001). No entanto, as alturas dos meteoros obtidas a partir das medidas por radar não representam as alturas verdadeiras devido a erros instrumentais, fazendo-se necessário a adoção de métodos para minimizar os erros.

Para corrigir este efeito, Hocking et al. (1997) assumem que a distribuição vertical de meteoros observados com sistemas do radar VHF pode ser aproximada por uma função de Gauss:

$$\exp\left\{-\frac{(h-h_{\tau})^2}{2\sigma_{\tau}^2}\right\} \quad (4.1)$$

em que h_{τ} é o ponto do máximo da função gaussiana e σ é o desvio padrão.

Centrada na altura h_{τ} . Considerando todos os meteoros para todos os possíveis tempos de decaimento de ecos, estabeleceu-se que a altura de máxima ocorrência dos ecos meteóricos é de 90 km para medidas por radar VHF e, por conseguinte, a distribuição vertical de meteoros também pode ser aproximada como uma função de Gauss:

$$\exp\left\{-\frac{(h-h_p)^2}{2\sigma_p^2}\right\} \quad (4.2)$$

em que h_p é a altura de máxima ocorrência de meteoros.

4.2.3. Tempo de decaimento

A medida do tempo de decaimento ($T_{1/2}$) que a amplitude do eco demora para atingir o valor de 1/e da sua amplitude máxima é calculada por:

$$T_{1/2} = \frac{\lambda^2}{16\pi^2 D} \quad (4.3)$$

Em que D é o coeficiente de difusão ambipolar e λ é o comprimento de onda da frequência emitido.

O menor tempo de decaimento que pode ser razoavelmente detectado é 0,025 s (Hocking et al., 1997). Esse parâmetro é reduzido com a altura.

4.2.4. Período e qualidade do sinal

Nos meteoros se a relação sinal e ruído é pequena o programa pode não decidir com relação a duas possíveis posições de meteoros no céu (Hocking et al., 2001).

Uma pequena quantidade de meteoros apresenta ambiguidade angular. Quando há ambiguidade nos meteoros é necessário fazer um outro cálculo para determinar a

altura do meteoro. Quando a frequência do pulso do sistema é superior a 1500 Hz o cálculo para determinação da altura é mais complicado (Hocking et al., 2001).

4.3. Estimativa da altura do pico

As observações feitas pelo radar são usadas para determinar a altura média para todos os dados com um tempo de decaimento selecionado, como uma média ponderada das funções distribuição Gaussianas das alturas reais e a altura de máxima ocorrência de meteoros:

$$h_{medida} = \frac{\int_{h=-\infty}^{\infty} h \left\{ \exp\left[-(h-h_{\tau})^2 / (2\sigma_{\tau}^2)\right] \exp\left[-(h-h_p)^2 / (2\sigma_p^2)\right] \right\} dh}{\int_{h=-\infty}^{\infty} \exp\left[-(h-h_{\tau})^2 / (2\sigma_{\tau}^2)\right] \exp\left[-(h-h_p)^2 / (2\sigma_p^2)\right] dh} \quad (4.4)$$

onde h_{τ} é a altura real do meteoro correspondente ao tempo de decaimento τ e h_p é a altura de máxima ocorrência dos meteoros. A altura corrigida (real) h_{τ} é obtida mediante a solução desta equação pelo método da inversão. Para tanto, uma rotina computacional, usando os procedimentos descritos por Hocking et. al. (1997), foi desenvolvida para corrigir as alturas medidas pelo radar.

4.4. Uso do índice solar F10.7 cm

O fluxo solar que possui comprimento de onda de 10,7 centímetros equivale a um índice útil de atividade solar. Esse parâmetro é utilizado para aplicações na astronomia, modelagem climática, geofísica, meteorologia e comunicações por satélite (Huang et al., 2009).

O fluxo de rádio solar na faixa 10,7 centímetros também é um indicador geral de atividade solar magnética, ultravioleta, emissões de RX e irradiância solar (Huang et al., 2009).

4.4.1. Correlação múltipla

A análise de correlação tem grande importância em estudos pois pode ser utilizada tanto com o resultado final como em etapas de outras técnicas de análise. Métodos estatísticos como a análise de correlação e a análise de regressão são muito utilizadas para verificar o grau de relacionamento entre variáveis (Lira, 2004).

Nos estudos de análises de variáveis é necessário apenas determinar o grau de relacionamento entre as variáveis analisadas. Porém, as vezes se faz necessário um detalhamento como o da análise de regressão (Lira, 2004).

4.5. Dessazonalização de dados

Para dessazonalizar os dados os períodos significativos (350, 148 e 98 dias) foram encontrados através do uso da técnica de análise de espectro usando o periodograma de Lomb-Scargle e um ajuste sinusoidal foi extraído de cada série anual.

4.6. Correlação cruzada

Na presente pesquisa foi usado o método da correlação cruzada para verificar a correlação entre a altura do meteoro e o tempo em meses e entre a altura e o fluxo solar $F_{10,7}$. Foi utilizado um deslocamento (lag) de um mês (entre -4 e +4), ou seja, os resultados são atrasados e adiantados em 4 postos, cujos resultados estão apresentados na Tabela 1.

4.7. Análise de regressão linear múltipla

Para encontrar uma possível tendência a longo prazo e influência da atividade solar sobre as médias mensais das alturas de máxima ocorrência de meteoros dessazonalizadas, as séries de dados foram submetidas a uma análise de regressão linear múltipla (Jacobi, 2014):

$$H_{dess} = a + b \times M + c \times F_{10,7} \quad (5.2)$$

com $F_{10,7}$ como o fluxo de rádio solar, M como os meses e H_{dess} sendo as alturas do pico de ocorrência dos meteoros dessazonalizadas. Os coeficientes parciais de regressão $b = -5,5$ m/mês e $c = 447$ m/100 sfu foram obtidos para todo o período.

Ao levar em consideração apenas o período de declínio do ciclo solar, ou seja, entre 2002 e 2008, foram obtidos os seguintes coeficientes parciais de regressão $b = -6,3$ m/mês e $c = 685$ m/100 sfu.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As alturas diárias de máxima ocorrência de meteoros e a respectiva média móvel de 30 dias (linha azul), obtidas durante o período compreendido entre março de 1999 a julho de 2006 e de setembro de 2007 a outubro de 2008 em Cachoeira Paulista, são representados no gráfico superior da Figura 5. A altura de máxima ocorrência de meteoros apresenta variação anual com máximos em dezembro-janeiro e mínimo em maio-junho. A variação sazonal na altitude dos ecos meteóricos é atribuída a variação sazonal da densidade do ar (Westman et al., 2004; Clemesha e Batista, 2006).

As observações incluem o ciclo solar 23 em quase sua totalidade, o qual é representado pelo fluxo solar em 10,7 cm no gráfico inferior da Figura 5, cuja média móvel de 30 dias está representada pela linha azul. O fluxo solar em 10,7 cm é dado em unidades de fluxo solar, sfu ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W/m}^2 \text{ Hz}$) e é um indicador importante da atividade solar, uma vez que apresenta uma alta correlação com o fluxo solar no ultravioleta (Chatterjee e Das, 1995), que por sua vez afeta as regiões da estratosfera, mesosfera e ionosfera da Terra. Conforme pode ser notado na figura, a altura de máxima ocorrência dos meteoros apresenta um declínio após 2002, justamente quando se inicia a fase de declínio do ciclo solar 23.

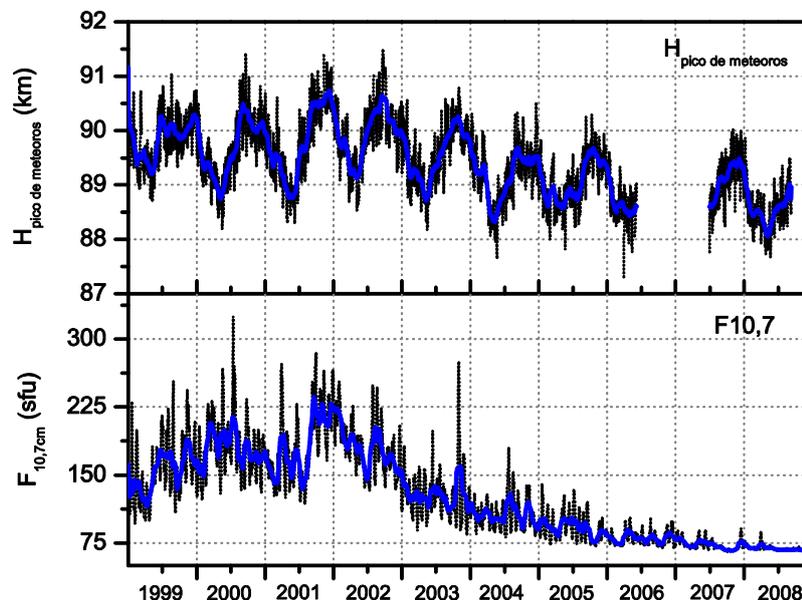


Figura 5 – Valores diários (a) da altura de máxima ocorrência de meteoros sobre C. Paulista (gráfico superior) e (b) do fluxo solar em 10,7 cm (gráfico inferior). A média móvel de 30 dias também são representados (em azul).

Antes de prosseguir os testes de análise para encontrar um possível tendência a longo prazo e efeitos da atividade solar, cada série anual dos dados diários da altura de meteoros do eco de pico foi dessazonalizada.

Na Figura 6 estão representados os valores médios mensais referente a altura de pico de meteoros (gráfico superior) e as respectivas médias mensais dessazonalizadas (gráfico inferior). Nos gráficos também estão representados os desvios-padrão (barras de erro) bem como um ajuste linear (linha vermelha). Usando os coeficientes obtidos com os ajustes, foi possível estimar que a altura média mensal do pico da ocorrência de meteoros decaiu de 0,0105 km/mês em ambos os casos, sugerindo uma queda de 1260 m em uma década, ou seja, uma queda de 1090 m para todo o período de observação. Quando apenas o período de declínio é considerado, a queda do pico de meteoros foi estimada em 1330 m entre os anos de 2002 e 2008.

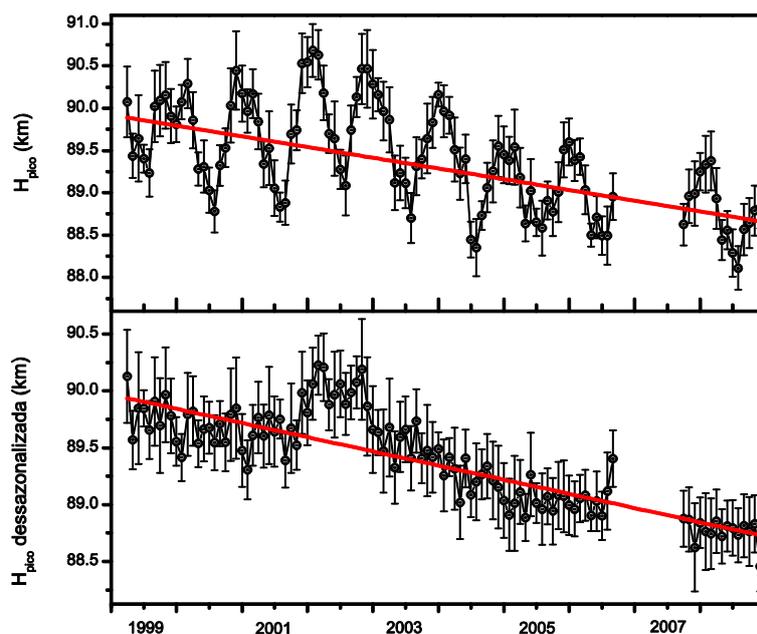


Figura 6 - Valores médios mensais da altura de máxima ocorrência de meteoros (superior) em Cachoeira Paulista e as respectivas médias mensais dessazonalizadas (inferior). Nos gráficos também estão representados os desvios-padrão (barras de erro) e o ajuste linear (linha vermelha).

Na Figura 7 estão representados os gráficos das médias mensais das alturas de máxima ocorrência de meteoros e o índice solar $F_{10,7}$, para os dados originais (esquerda) e dessazonalizados (direita). Adicionalmente, um ajuste linear (azul) e um ajuste

polinomial (vermelho) de segunda ordem também estão representados para os dados dessazonalizados. Para o ajuste polinomial de segunda ordem tem-se um coeficiente de correlação de 0,8 enquanto para o ajuste linear o coeficiente de correlação foi de 0,7.

Observando os gráficos nota-se uma relação positiva entre a altura de máxima ocorrência de meteoros e o fluxo solar, sendo que para a série original os pontos se encontram mais afastados uns dos outros, enquanto que para a série dessazonalizada os pontos se encontram mais juntos cujo comportamento se assemelha a uma curva polinomial de segunda ordem.

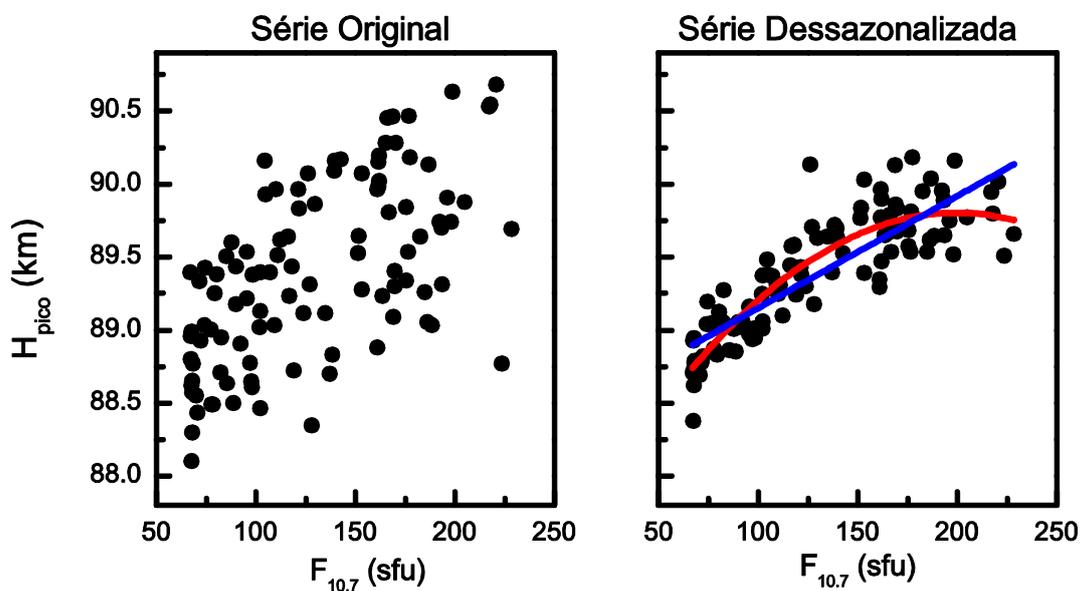


Figura 7 – Dispersão entre as médias mensais das alturas de máxima ocorrência de meteoros e o índice solar $F_{10,7}$, para os dados originais (esquerda) e dessazonalizados (direita), juntamente com os ajustes linear (azul) e polinomial de segunda ordem (vermelho).

A correlação entre a altura e o tempo foi maior para $\text{lag}=0$, tendo como resultado -0,607. Para o caso da altura dessazonalizada, o coeficiente de correlação de -0845 foi obtido para o $\text{lag}=0$. Esses resultados mostram que a altura decai com o tempo, durante o período em questão pois as correlações são negativas.

A correlação entre a altura de máxima ocorrência de meteoros e o fluxo solar $F_{10,7}$, foi melhor para os $\text{lags}=2$ e 3 com um valor de 0,623, ou seja, a altura do pico de meteoros aumenta à medida que o fluxo solar aumenta, em que os máximo da altitude

estão adiantados, entre 2 e 3 postos, em relação ao fluxo solar. Para a altura dessazonalizada a melhor correlação foi para o deslocamento lag=0 com uma correlação de 0,848.

Tabela 1 - Correlação cruzada entre médias mensais das alturas de máxima ocorrência de meteoros e o tempo (meses) e o índice F10,7.

Correlação	Deslocamento (Lag)								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
H X meses	-0.538	-0.559	-0.577	-0.591	-0.607	-0.585	-0.581	-0.572	-0.571
H _{dessaz} X meses	-0.729	-0.754	-0.778	-0.802	-0.845	-0.813	-0.801	-0.776	-0.754
H X F10.7	0.497	0.519	0.551	0.573	0.609	0.623	0.653	0.653	0.622
H _{dessaz} X F10.7	0.723	0.750	0.786	0.804	0.848	0.842	0.836	0.825	0.807

Para verificar a significância das correlações, o seguinte teste (Zar, 1972) foi usado:

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (5.1)$$

em que r é o coeficiente de correlação. Este teste segue aproximadamente uma distribuição de Student com $n-2$ graus de liberdade sob as hipóteses nulas. Aplicando o teste e analisando as tabelas estatísticas referentes ao mesmo (Zar, 1972), verifica-se que, em todas as análises as correlações têm mais de 99% de chance de serem significativas.

Nos casos em que os dados não formam uma nuvem comportada, com alguns pontos bem distantes dos demais, ou em que parece existir uma relação crescente ou decrescente num formato de curva, o coeficiente de correlação por postos de Spearman é mais apropriado (Lira, 2004). Portanto, os dados também foram submetidos a análise de correção por postos de Spearman.

Na tabela 2 encontra-se os valores dos coeficientes de Spearman entre as médias mensais das alturas de máxima ocorrência de meteoros e o tempo e entre as referidas alturas e o índice do fluxo solar $F_{10,7}$. Observando a tabela, verifica-se mais uma vez que

os coeficientes são mais significativos para os dados dessazonalizados, os quais também têm mais de 99% de chance de serem significativos, de acordo com o teste de significância.

Tabela 2 - Coeficientes de Spearman entre médias mensais das alturas de máxima ocorrência de meteoros e o tempo (meses) e o índice F10,7 e os respectivos valores das melhores correlações cruzadas.

Correlação	ρ	Cruzada
H X meses	-0.614	-0.607
H_{dessaz} X meses	-0.839	-0.845
H X F10.7	0.613	0.653
H_{dessaz} X F10.7	0.873	0.848

Conforme apresentado, os coeficientes de correlação entre as grandezas envolvidas foram maiores para os dados dessazonalizados. Portanto, os dados dessazonalizados serão utilizados para estudar os possíveis efeitos do fluxo solar na altura de máxima ocorrência de meteoros.

Para analisar a tendência de longo prazo, as alturas do pico de ocorrência de meteoros após a eliminação da influência da atividade solar foram utilizadas e a tendência linear foi estimada. Os resultados são apresentados na Figura 8. O ajuste linear indica uma tendência de declínio na altura de máxima ocorrência de 5,4 m/mês para todo o período observado, equivalente a 64,8 m/ano.

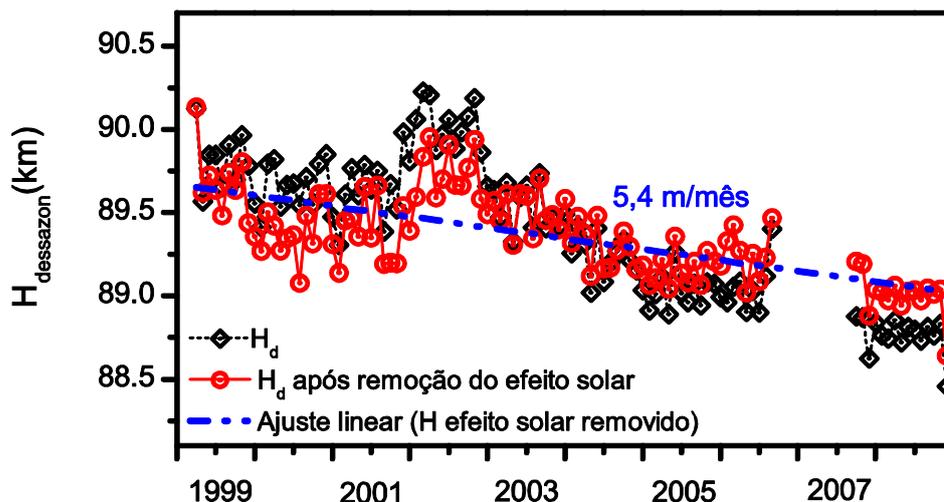


Figura 8 – Altura média mensal dessazonalizada de meteoros de pico (preto) e seus valores após eliminação da atividade solar da parte induzida (vermelho), juntamente com ajuste linear (tracejada linha azul), por intervalo de tempo 1999-2008.

Na Figura 9 estão representadas as alturas de pico de meteoros mensais médios como uma função de fluxo solar $F_{10,7}$ (losangos pretos). Os círculos em vermelho representam os valores após a eliminação da parte da tendência, juntamente com um ajuste linear (tracejada linha azul). A tendência linear indica uma diminuição da altura de pico com cerca de 1054 m 2002-2008 e cerca de 248 m para todo o período observado.

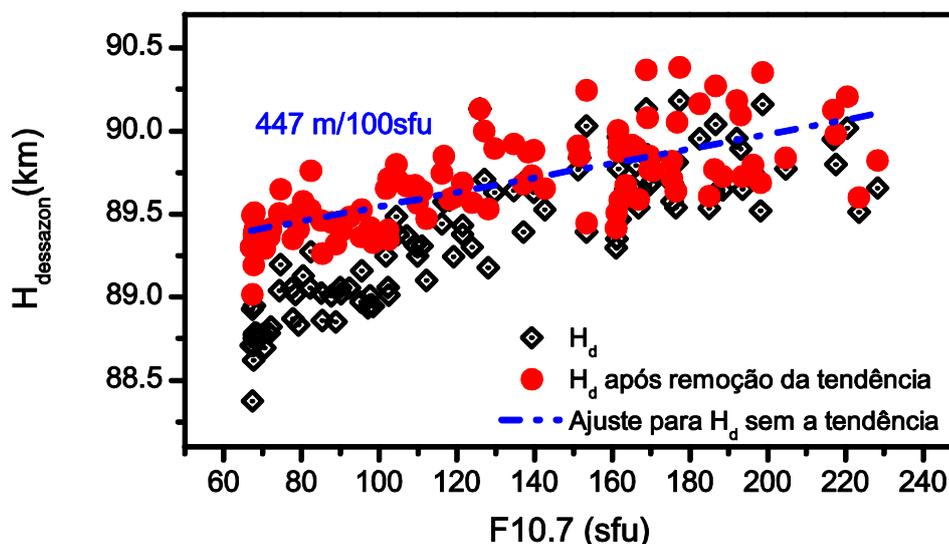


Figura 9 – Altura média anual de máxima ocorrência de meteoros (preto) e os respectivos valores após a eliminação da tendência (vermelho) em função do fluxo solar. A linha pontilhada representa o ajuste linear.

Na Figura 10 estão representadas as séries normalizadas das médias anuais das alturas de pico de meteoros (círculos pretos) e do fluxo solar $F_{10,7}$ em função do tempo. Há uma grande correspondência entre as duas sequências, principalmente após 2002, quando se inicia a fase de declínio do ciclo solar 23.

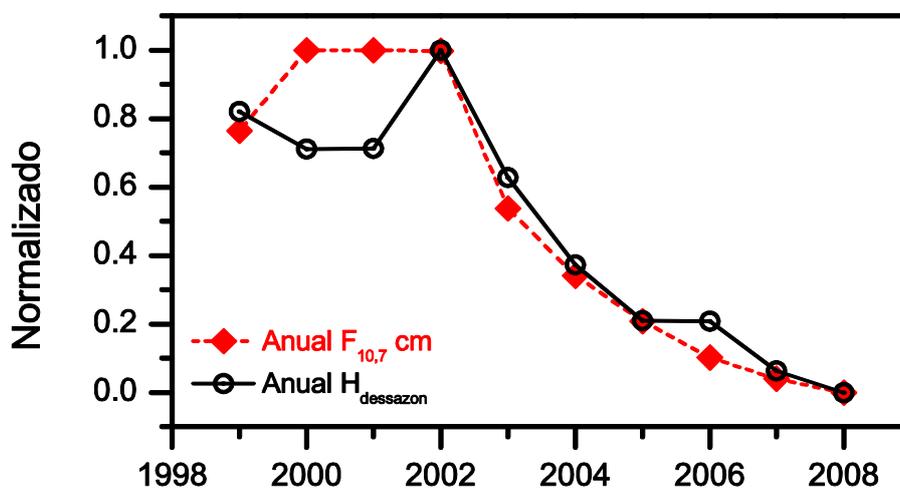


Figura 10 – Altura média anual normalizada de meteoros de pico e os respectivos valores do fluxo solar $F_{10,7}$ normalizado (vermelho), por intervalo de tempo 1999-2008.

Com o objetivo de analisar as tendências a longo prazo, os valores médios residuais das alturas, depois de eliminar a influência da atividade solar, foram utilizados e os resultados são mostrados na Figura 11. A partir de uma análise dos valores dessazonalizados (círculos pretos), pode ser visto que a média anual das alturas dos meteoros caiu aproximadamente 1240 m, durante a fase de declínio do ciclo solar 23, entre 2002 e 2008, e para todo o período de observação, a queda na altura do pico de meteoros foi de 1015 m. Após a eliminação dos efeitos devido a atividade solar, usando $F_{10,7}$, uma diminuição de cerca de 328 m (35,3 m/ano) foi estimado para todo o intervalo considerado neste estudo. A tendência de declínio na altura de máxima ocorrência de 35,3 m/ano, obtida neste estudo, foi muito próximo do

valor encontrado por Bremer e Peters (2008) que encontraram a partir da observação da altura de reflexão de sinal ionosférico em baixa frequência, no Hemisfério Norte para o período entre 1959 e 2006, uma tendência linear de -32 m/ano, após a remoção do sinal induzido pelas atividades solar e geomagnética.

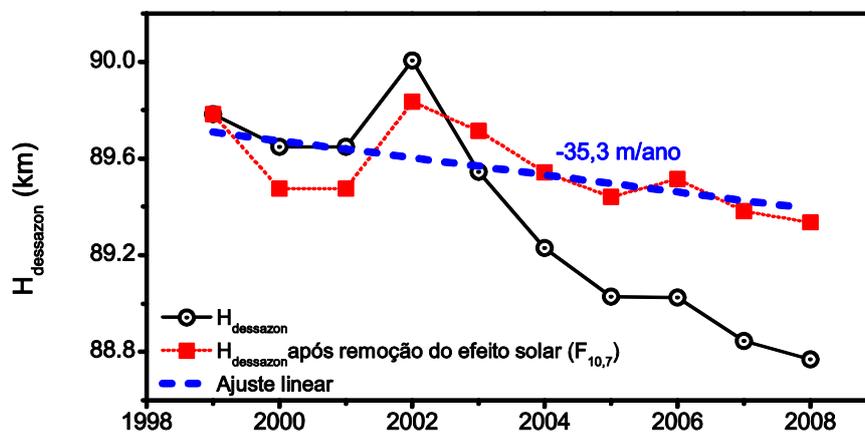


Figura 11 – Altura média anual dessazonalizada de meteoros de pico (preto) e seus valores após eliminação da atividade solar da parte induzida (vermelho), juntamente com ajuste linear (tracejada linha azul), por intervalo de tempo 1999-2008.

Na Figura 12 os círculos pretos representam as alturas médias anuais dessazonalizadas dos meteoros em função do fluxo solar $F_{10.7}$. Os círculos vermelhos representam os valores após a eliminação da tendência, em que os respectivos ajustes lineares (linhas tracejadas) também foram incluídos. Para todo o período observado, a tendência linear indicou uma diminuição da altura do pico de meteoros de cerca de 565 m para o índice $F_{10.7}$.

A tendência para todo o período (662 m/100 sfu) é maior do que a tendência encontrada por Jacobi (2014), usando dados obtidos por radar meteórico em Collm (51,3°N, 13,0°E) no período entre 2004 e 2013, o qual encontrou um valor de 450 m/100 sfu. A tendência linear indicou uma redução da altura do pico de cerca de 1040 m durante a fase descendente do ciclo solar 23.

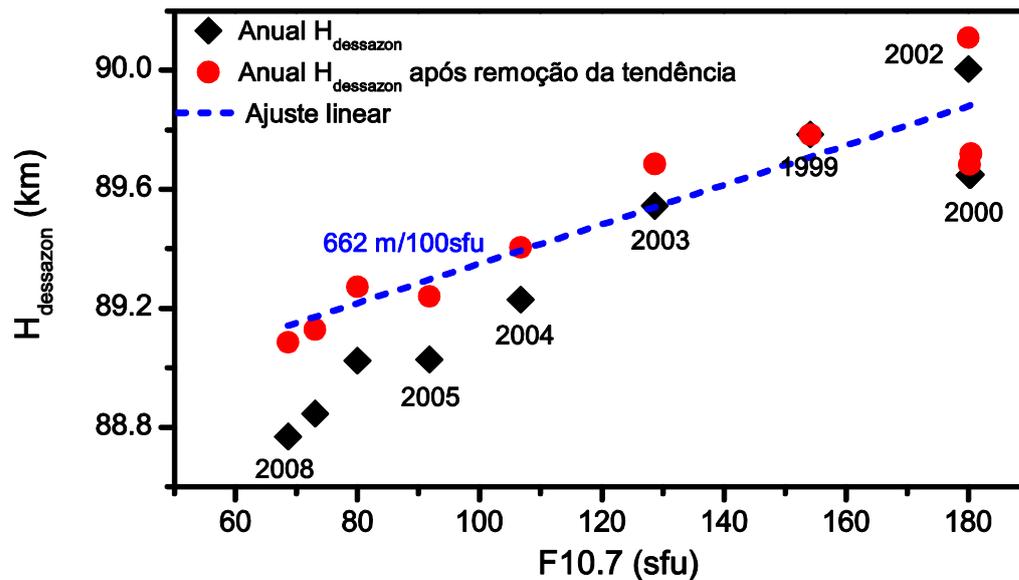


Figura 12 – Altura média anual dessazonalizada de máxima ocorrência de meteoros (preto) e os respectivos valores após a eliminação da tendência em função do fluxo solar. A linha pontilhada representa o ajuste linear.

Alguns indicadores têm sido utilizados para fornecer informações sobre variações de longo prazo na MLT e na ionosfera e sua correlação com a atividade solar. Por sua vez, os meteoros dependem da velocidade de entrada e da massa dos meteoróides. A altura de ocorrência dos meteoros também pode ser afetada pela densidade neutra do ambiente onde ocorre a ablação. Portanto, se a massa e a velocidade de entrada dos meteoróides são consideradas constantes, por conseguinte, a altura de ablação de meteoros pode ser determinada pela distribuição de densidade vertical (Jacobi et al., 2011).

Sabe-se que a atmosfera e ionosfera expandem com o crescimento da atividade solar para altitudes elevadas. De acordo com as observações de arrasto por satélite, a densidade neutra apresenta uma tendência decrescente ao longo do tempo (Emmert et al., 2008). A densidade termosférica derivada a partir de dados do arrasto sobre os objetos que orbitam ao redor da Terra mostrou que as médias anuais de densidade média global em 400 km caiu de cerca de 6 ng/m^3 a $0,5 \text{ ng/m}^3$, entre 2002 e 2008 (Solomon et al., 2011). Por conseguinte, a diminuição da altura do pico de eco meteoro observado durante ciclo solar de 23 em Cachoeira Paulista pode ser interpretado como sendo uma

consequência da redução na densidade do ar na atmosfera superior, que foi induzida em parte, pelos efeitos do ciclo solar de 11 anos.

Na tabela 3 encontra-se um resumo dos resultados encontrados mostrando os valores da redução das alturas de máxima ocorrência de meteoros em diferentes análises.

Tabela 3 – Redução das alturas de máxima ocorrência de meteoros em diferentes análises.

Dados	Mensal	Anual	Todo o período	Fase de declínio
Altura/Altura dessazonalizada	10,5 m	126 m	1090 m	1330 m
Ajuste linear com dados mensais após remoção do efeito solar	5,4 m	64,8 m	-----	-----
Ajuste linear com dados mensais após remoção da tendência	-----	-----	248 m	1054 m
Ajuste linear com dados anuais após remoção do efeito solar	-----	35,3 m	328 m	-----
Ajuste linear com dados anuais após remoção da tendência	-----	-----	565 m	1040 m

6. CONCLUSÕES

Este trabalho foi desenvolvido visando investigar a distribuição vertical de meteoros durante o ciclo solar 23 e analisar sua relação com o fluxo solar $F_{10,7}$. Para tanto foram utilizados dados obtidos através de medidas por radar meteórico instalado em Cachoeira Paulista-SP (22,7°S; 45°O).

Os resultados obtidos evidenciam que, durante a fase de declínio do ciclo solar 23, a queda das alturas de pico dos meteoros é maior do que a queda em todo período observado.

Durante o período estudado foram verificadas fortes correlações negativas entre as alturas de pico dos meteoros, obtidos a partir de medidas por radar meteórico, e o tempo, enquanto que as correlações entre as alturas dos meteoros e o fluxo solar foram positivas. Fisicamente, isso indica que as alturas de máxima ocorrência de meteoros diminuem com o passar tempo e as alturas diminuem a medida que o fluxo solar também diminui.

A partir dos resultados verificou-se que a altura de máxima ocorrência de meteoros diminuiu à medida que o fluxo solar também diminuiu. Os resultados indicam uma diminuição da altura do pico de aproximadamente 565 m para todo o período observado. Considerando apenas o período de declínio do ciclo solar (de 2002 a 2008) a queda foi de aproximadamente 1040 m. O decréscimo da altura de ocorrência de meteoros pode ser atribuído, em parte, a efeitos da atividade solar. Esses resultados são interpretados como devido a diminuição da pressão e da temperatura na altitude de ocorrência dos meteoros com uma consequente redução da densidade e, portanto, uma diminuição na ocorrência da altura do pico de meteoros.

Os meteoros dependem da velocidade de entrada e massa dos meteoroides. Se esses parâmetros são considerados constantes, a altura em que ocorre a ablação pode ser determinada através da distribuição da densidade vertical. Sabendo que a atmosfera se expande com o crescimento da atividade solar a densidade neutra apresenta uma tendência decrescente ao longo do tempo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEE, E. M.; EMILY C.; KANDACE G. An Extended Solar Cycle 23 with Deep Minimum Transition to Cycle 24: Assessments and Climatic Ramifications. **J. Climate**, 23, 6110–6114, 2010.

ALMEIDA, A. C. A. **Estudo das correlações entre a atividade solar e processos atmosféricos**. 2001. 89f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ALVES, E. O. **Influência em curta duração de ondas planetárias na dinâmica das marés atmosféricas observadas nos ventos meteóricos de São João do Cariri-PB**. 2012. 256f. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

ARAÚJO, L. R. **Sazonalidade de ondas planetárias nos ventos meteóricos observados em São João do Cariri-PB e em Cachoeira Paulista-SP**. 2012. 101f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande.

ARNOLD, N. F.; ROBINSON, T. R. Solar cycle changes to planetary wave propagation and their influence on the middle atmosphere circulation, **Ann. Geophysicae**, 16, 69–76, 1998.

BALACHANDRAN, N. K.; RIND, D. Modeling the effects of UV variability and the QBO on the troposphere-stratosphere system. Part 1: the middle atmosphere, **J. Clim.**, 8, 2058–2079, 1995.

BALDWIN, M. P.; DUNKERTON, T. J. The solar cycle and stratosphere-troposphere dynamical coupling. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**.67, 7182, 2005.

BAUMGAERTNER, A. J. G.; MCDONALD, A. J., FRASER, G. J.; PLANK, G. E. Long-term observations of mean winds and tides in the upper mesosphere and lower thermosphere above Scott Base, Antarctica, **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, 67, 1480–1496, 2005.

BEIG, G., Long-term trends in the temperature of the mesosphere/lower thermosphere region: 2. Solar response. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 116, 2156-2202, 2011.

BRASSEUR, G.; SOLOMON, S., *Aeronomy of the Middle Atmosphere*, **D. Reidel Publishing Company**, Dordrecht, Holland, 1984.

BREMER, J. Long-term trends in the ionospheric E and F1 regions. **Ann. Geophys.**, 26, 1189–1197, 2008.

- BREMER, J.; PETERS, D. Influence of stratospheric ozone changes on long term trends in the meso- and lower thermosphere, **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, 70, 1430-1440, 2008.
- BUMBA, V. Influence de l'activité solaire sur le nombre des observations de météores, de traînées météoriques et de chutes météoritiques, **Bull. Astron. Inst. Czechosl.** 1, 93. 1949.
- CHAPMAN, G. A; STEPHEN, R. W.; PREMIGER, D. G. COOKSON, A. M. TOMA, G. WHITE, O. R. Solar cycle 23: an anomalous cycle? **The Astrophysical Journal**, 609:1140–1152, 2004.
- CHATTERJEE, T. N.; DAS, T. K. Relation between solar UV flux and 10.7-cm radio emission. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 274, 858-860. 1995.
- CLEMESHA, B.; BATISTA, P. The quantification of long-term atmospheric change via meteor ablation height measurements. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Volume 68, Issue 17, December 2006, Pages 1934-1939.
- CORRÊA, J. A. S. **Estudo de meteoros e investigação de seus efeitos na ionosfera com dados do radar SKiYMET e GPS**. 2003. 151f. Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- ELLYETT, C. Solar influence on meteor rates and atmospheric density variations at meteor heights. **J. Geophys. Res.** 82, 1455-1462. 1977.
- EMMERT, J. T.; LEAN, J. L.; PICONE, J. M. Record-low thermospheric density during the 2008 solar minimum, **Geophys. Res. Lett.**, 37, L12102, 2010.
- EMMERT, J. T.; PICONE, J. M.; MEIER, R. R. Thermospheric global average density trends, 1967-2007, derived from orbits of 5000 near-Earth objects, **Geophys. Res. Lett.**, 35, L05101, 2008.
- FRASER, G. J. Long-term variations in mid-latitude southern hemisphere mesospheric winds, **Adv. Space Res.**, 10, 247–250, 1990.
- HAIGH, J. D., The effects of solar variability on the Earths climate. **Philos.Trans. Roy. Soc. London**, 361A, 95111. 2003.
- HOCKING, W. K.; FULLER, B.; VANDEPEER, B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology, **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 63, 155-169, ISSN 1364-6826, 2001.
- HOCKING, W. K.; THAYAPARAN, T.; JONES, J. Meteor decay times and their use in determining a diagnostic mesospheric Temperature-pressure parameter: Methodology and one year of data. **Geophysical Research Letters**, 24,2977-2980, 1997.
- JACOBI, CH. On the solar cycle dependence of winds and planetary waves as seen from mid-latitude D1 LF mesopause region wind measurements, **Ann. Geophys.**, 16, 1534–1543, 1998.
- JACOBI, CH.; HOFFMANN, P.; KURSCHNER, D., Trends in MLT region winds and planetary waves, Collm (52°N, 15°E), **Ann. Geophys.**, 26, 1221-1232, 2008.

JACOBI, CH.; HOFFMANN, P.; PLACKE, M.; STOBER, G. Some anomalies of mesosphere/lower thermosphere parameters during the recent solar minimum. **Adv. Radio Sci.**, 9, 343348. 2011.

JACOBI, CH.; KURSCHNER, D. Long-period upper mesosphere temperature and plasma scale height variations derived from VHF meteor radar and LF absolute reflection height measurements. **Adv. Radio Sci.**, 4, 351355. 2006.

JACOBI, CH.; LANGE, M.; KURSCHNER, D.; MANSON A. H.; MEEK, C. E. A long-term comparison of Saskatoon MF radar and Collm LF D1 mesosphere- lower thermosphere wind measurements, **Phys. Chem. Earth**, 26, 419–424, 2001.

JACOBI, CH.; SCHMINDER, R.; KURSCHNER, D.; BREMER, J.; GREISIGER, K. M.; HOFFMANN, P.; SINGER, W. Long-term trends in the mesopause wind field obtained from LF D1 wind measurements at Collm, Germany, **Adv. Space Res.**, 20, 11, 2085–2088, 1997.

JACOBI, C. Meteor heights during the recent solar minimum. **Adv. Radio Sci.**, 12, 161–165, doi:10.5194/ars-12-161-2014. 2014.

JONES, J.; WEBSTER, A. R.; HOCKING, W. K. An improved interferometer design for use with meteor radars, **Radio Sci.**, 33, 55-65. 1998.

KEUER, D.; HOFFMANN, P.; SINGER, W.; BREMER, J. Long-term variations of the mesospheric wind field at mid-latitudes. **Annales Geophysicae**, 25, 8, 1779-1790, 2007.

KÜRSCHNER, D.; JACOBI, Ch. Quasi-biennial and decadal variability obtained from longterm measurements of nighttime radio wave reflection heights over central Europe. **Adv. Space Res.**, 32, 1701-1706, 2003.

LABITZKE, K., VAN LOON, H. Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. I. The troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, 50, 197–206, 1988.

LABITZKE, K.; VAN LOON, H. Association between the 11-year solar cycle and the atmosphere. Part V: Summer. **Journal of Climatology**.5, 240251.1992.

LEAN, J. L.; ROTTMAN, G. J.; KYLE, H. L.; WOODS, T. N.; HICKEY, J. R.; PUGA, L. C. Detection and parameterization of variations in solar mid- and near-ultraviolet radiation (200400 nm). **Journal of Geophysical Research**.102, 2993929956. 1997.

LEITE, M. F. **Análise da temperatura da região próxima a mesopausa equatorial durante evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar**. 2012. 67f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande.

LIMA, L. M.; ALVES, E. O. ; BATISTA, P. P. ; CLEMESHA, B.R. ; MEDEIROS, A. F. ; BURITI, R.A. . Sudden stratospheric warming effects on the mesospheric tides and

2-day wave dynamics at 7°S. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 78-79, p. 99-107, 2012.

LINDBLAD, B. A. Meteor radar rates and the solar cycle. **Nature**, 259, 99-101, 1976.

LIRA, S. A. **Análise da correlação: Abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. 2004. 209f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MERZLYAKOV, E. G.; PORTNYAGIN, Yu. I. Long-term changes in the parameters of winds in the midlatitude lower thermosphere (90–100 km), *Izvestiya*, **Atmos. Ocean. Phys.**, 35, 428-493, 1999.

MIDDLETON, H. R.; MITCHELL, N. J.; MULLER, H. G. Mean winds of the mesosphere and lower thermosphere at 52 N in the period 1988–2000, **Ann. Geophys.**, 20, 81–91, 2002.

MOZETO, A. A. Química atmosférica: a química sobre nossas cabeças. **Caderno Temático Química Nova na Escola**, 01: 41-49, 2001.

NAMBOOTHIRI, S. P.; MEEK, C. E.; MANSON, A. H. Variations of mean winds and solar tides in the mesosphere and lower thermosphere over time scales ranging from 6 months to 11 yr: Saskatoon, Canada, 52N, 107W, **J. Atmos. Terr. Phys.**, 56, 1313–1325, 1994.

PERTSEV, N.; PERMINOV, V. Response of the mesopause airglow to solar activity inferred from measurements at Zvenigorod, Russia, **Ann. Geophys.**, 26, 1049-1056, doi:10.5194/angeo-26-1049-2008, 2008.

SALBY, M. L. **Fundamentals of atmospheric physics**. Boulder: Academic Press, 1995. 649p.

SANTOS, P. V. **Medidas de temperatura mesosférica obtida meteórica na região de São João do Cariri-PB (7,4° S; 36,5° W)**. 2010. 89f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SOLOMON, S. C.; QIAN, L.; DIDKOVSKY, L. V.; VIERECK, R. A.; WOODS, T. N. Causes of low thermospheric density during the 2007–2009 solar minimum, **J. Geophys. Res.**, 116, A00H07, 2011.

SOLOMON, S. C.; WOODS, T. N.; DIDKOVSKY, L. V.; EMMERT, J. T.; QIAN, L. Anomalously low solar extreme-ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum, **Geophys. Res. Lett.**, 37, L16103, 2010.

TAO, D. **Experimental study of the influences of background atmospheric electron density on radar backscatter from meteor trails**. 2010. 41f. Dissertation (Master of Science). Institute of Atmospheric Physics (IAP) Kühlungsborn, Germany.

WANG, Y. M. ROBBRECHT, E. SHEELEY JR, N. R. On the weakening of the polar magnetic fields during solar cycle 23. **The Astrophysical Journal**, 707:1372–1386, 2009.

WESTMAN, A., WANNBERG, G., PELLINEN-WANNBERG, A. Meteor head echo altitude distributions and the height cutoff effect studied with the EISCAT HPLA UHF and VHF radars. **Annales Geophysicae**, 22, 1575-1584, 2004.

WRASSE, C. M., **Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**, 2004. 255p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

YOUNGER, P. T.; ASTIN, I.; SANDFORD, D. J.; MITCHELL, N. J. The sporadic radiant and distribution of meteors in the atmosphere as observed by VHF radar at Arctic, Antarctic and equatorial latitudes, **Ann. Geophys.**, 27, 2831-2841, 2009.

ZAR, J. H. Significance Testing of the Spearman Rank Correlation Coefficient. **Journal of the American Statistical Association**, 67, 339, 578-580. 1972.