

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

CRAAM – CENTRO DE RÁDIO ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA MACKENZIE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E APLICAÇÕES

GEOESPACIAIS - CAGE

Celi Cristina Passarelli Iamazaki

**A PROFUNDIDADE ÓTICA EM 45 E 90 GHz NO OBSERVATÓRIO DO
EL LEONCITO.**

São Paulo

2019

Celi Cristina Passarelli Iamazaki

**A PROFUNDIDADE ÓTICA EM 45 E 90 GHz NO OBSERVATÓRIO DO
EL LEONCITO.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Aplicações Geoespaciais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Guillermo Giménez de Castro

São Paulo

2019

IP Iamazaki, Celi Cristina Passarelli

A profundidade óptica em 45 e 90 GHz no observatório do El Leoncito / Celi Cristina Passarelli Iamazaki – São Paulo, 2019.

98 f.: il., 30 cm.

Mestrado (Mestrado em Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Guillermo Giménez de Castro

Bibliografia: f. 79-81

1. Profundidade óptica 2. Opacidade atmosférica 3. POEMAS 4. El Leoncito 5. Radioastronomia solar I. Castro, orientador. II. Título.

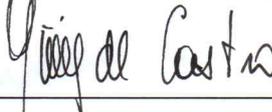
CDD 621.3

CELI CRISTINA PASSARELLI IAMAZAKI

**A PROFUNDIDADE ÓTICA EM 45 E 90 GHz NO OBSERVATÓRIO DO
EL LEONCITO.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Aplicações Geoespaciais.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Carlos Guillermo Giménez de Castro

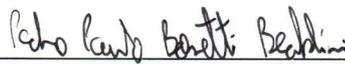
Orientador

Universidade Presbiteriana Mackenzie



Prof. Dr. Jean Pierre Raulin

Universidade Presbiteriana Mackenzie



Prof. Dr. Pedro Paulo Bonetti Beaklini

(Universidade de São Paulo)

São Paulo
2019

AGRADECIMENTOS

Primeiro, quero agradecer a Deus pela ajuda e sustento nas horas difíceis.

Ao meu marido Alexandre, pelo carinho e companheirismo em todas as horas e a paciência sacerdotal nos momentos mais complicados (foram vários).

Aos meus pais Aguida e José Roberto, pelo esforço na minha formação, apoio incondicional e paciência nas minhas ausências.

À minha irmã Carla (“eu já sabia”) e meus sobrinhos Bruno e Felipe, pela “maior força”.

À minha amiga de todas as horas, Irma.

Ao meu orientador atual, Prof. Dr. Carlos Guillermo Giménez de Castro (Prof. Guigue), por tudo e pela paciência e disponibilidade.

Todos os Professores do CRAAM (Profa. Dra. Emília, Profa. Dra. Adriana, Prof. Dr. Jean Pierre e os Prof. Dr. Francisco), que me fizeram entender e aprender coisas que há muito estavam somente guardadas nos meus sonhos. Sem esquecer a Profa. Dra. Marta Maria Cassiano que esteve comigo no início e em boa parte dessa caminhada.

Aos meus colegas do CAGe, que foram muito importantes durante todo o desenvolvimento do meu caminho: Deysi (pelos comentários e orientações em muitos momentos), Lady, Claudio, Thiago, Sr. Odilon, Guilherme, Washington, Gabriel, Douglas, Ray e Jorge Fernando. Obrigada pelas dicas, ajudas e principalmente pela amizade.

Aos meus gestores da E.E. Prof. Manuel Ciridião Buarque, na figura da Diretora Karyn Baldini, e dos coordenadores Regina Helena Russo e Carlos Roberto Landsmann que muitas vezes fizeram malabarismos, para que eu pudesse cumprir os créditos e realizar os trabalhos.

Aos meus alunos, pela paciência nas ausências.

À Carol, pois sem ela, nada disso seria possível, afinal, foi ela o contato que me trouxe aqui.

Por fim, a CAPES e a MACK pesquisa que tornaram financeiramente possível essa jornada.

Resumo

A profundidade óptica é um parâmetro importante de ajuste na obtenção correta do fluxo de energia que caracteriza uma explosão solar. Portanto, conhecer seu valor e as variáveis que influenciam em sua modificação através do ano, em determinada localidade é fundamental. Assim, foi feita uma análise estatística dos valores da opacidade nos anos de 2012 e 2013 para as frequências de operação dos radiotelescópios POEMAS. Sendo que os valores da opacidade foram obtidos através do método “tipping” para 45 GHz e 90 GHz. Como resultado foi obtido do valor médio da profundidade óptica para o ano de 2012 para as frequências de 45 GHz e 90 GHz ($0,069 \pm 0,005 N_p$ e $0,057 \pm 0,014 N_p$ respectivamente) e para 2013 os valores de $0,068 \pm 0,005 N_p$ para 45 GHz e $0,057 \pm 0,017$ para 90 GHz. Também se fez um estudo para essas mesmas frequências, dos valores de opacidade para diversas estações do ano, para os anos de 2012 e 2013, observando-se um padrão diferenciado de opacidade para a estação úmida (verão/início do outono), do resto do ano (estação seca) para ambas frequências de estudo. Das análises foi notado que as medidas de opacidade de 90 GHz eram mais instáveis que as de 45 GHz, e que, os valores da opacidade não eram crescentes com a frequência, contrariando o esperado na literatura. Obtivemos também, para os dois anos, uma relação das frequências entre si no período seco, e se observou que as opacidades eram intercambiáveis, o que resulta importante para a frequência de 90 GHz que produz menos dados pelo método “tipping” e é mais ruidosa. Portanto, obtivemos para o ano de 2012 a relação $\tau_{90} = (3,499 \pm 0,063) \cdot \tau_{45} - (0,181 \pm 4,5 \times 10^{-3})$ e para 2013 obtivemos $\tau_{90} = (3,173 \pm 0,0070) \cdot \tau_{45} + (0,158 \pm 4,5 \times 10^{-3})$, por fim. Para o biênio 2012/2013 o resultado obtido foi de $\tau_{90} = (3,384 \pm 0,041) \cdot \tau_{45} - (0,173 \pm 2,9 \times 10^{-3})$. Também foram realizados estudos estatísticos para o PWV nos períodos analisados (2012/2013) e os valores do PWV (obtidos através da rede AERONET situada em EL Leoncito) relacionados com a opacidade gerando expressões para as duas frequências do POEMAS: $\tau_{90} = (8,3 \times 10^{-3} \pm 2,3 \times 10^{-5}) \cdot PWV + (3,3 \times 10^{-2} \pm 2,7 \times 10^{-4})$ e $\tau_{45} = (2,2 \times 10^{-3} \pm 2,3 \times 10^{-5}) \cdot PWV + (6,2 \times 10^{-2} \pm 8,5 \times 10^{-5})$. Por fim, foram realizadas algumas simulações com o software *ATM - Atmospheric Transmission at Microwaves* que mostraram concordância entre os valores do modelo e a opacidade obtida experimentalmente.

Palavras chaves: profundidade óptica; fluxo solar; ondas milimétricas; “tipping”, PWV, polarização.

Abstract

The optical depth is an important parameter of adjustment in obtaining the correct energy flow that characterizes a solar explosion. Therefore, knowing its value and the variables that influence its modification through the year, in each locality is fundamental. Thus, A statistical analysis of the opacity values was made in the years 2012 and 2013 for the operating frequencies of the radio telescopes poems. The opacity values were obtained through the "tipping" method for 45 GHz and 90 GHz. As a result it was obtained from the average value of the optical depth for the year 2012 for the frequencies of 45 GHz and 90 GHz (0.069 ± 0.005 np and 0.057 ± 0.014 NP respectively) and for 2013 the values of 0.068 ± 0.005 NP for 45 GHz and 0.057 ± 0.017 for 90 GHz. Also if f EZ A study for these same frequencies, of the opacity values for several seasons of the year, for the years 2012 and 2013, observing a differentiated pattern of opacity for the wet season (Summer/early autumn), the rest of the year (dry season) for both Study frequencies. From the analyses it was noted that the opacity measurements of 90 GHz were more unstable than those of 45 GHz, and that the opacity values were not increasing with the frequency, contradicting what was expected in the literature. For the two years, we also obtained a relationship between the frequencies of each other in the dry season, and it was observed that the opacities were interchangeable, which is important for the frequency of 90 GHz that produces less data by the "tipping" method and is noisiest. Therefore, the ratio $\tau_{90} = (3,499 \pm 0.063) \cdot \tau_{45} - (0,181 \pm 4,5 \times 10^{-3})$ and for 2013 we obtained $\tau_{90} = (3,173 \pm 0.0,070) \cdot \tau_{45} + (0.158 \pm 4, 5 \times 10^{-3})$, at last. For the biennium 2012/2013 the obtained result was $\tau_{90} = (3,384 \pm 0,041) \cdot \tau_{45} - (0,173 \pm 2, 9 \times 10^{-3})$. Statistical studies were also performed for PWV in the analyzed periods (2012/2013) and PWV values (obtained through The AERONET network located in EL Leoncito) related to the opacity generating expressions for the two frequencies of POEMAS: $\tau_{90} = (8,3 \times 10^{-3} \pm 2,3 \times 10^{-5}) \cdot \text{PWV} + (3,3 \times 10^{-2} \pm 2,7 \times 10^{-4})$ and $\tau_{45} = (2, 2 \times 10^{-3} \pm 2,3 \times 10^{-5}) \cdot \text{PWV} + (6, 2 \times 10^{-2} \pm 8,5 \times 10^{-5})$. Finally, some simulations were performed with the *ATM - Atmospheric Transmission at microwaves* software that showed concordance between the model values and the opacity obtained Experimentally.

Keywords: Optical depth, Solar Flux, Millimeter waves, tipping, Precipitable Water Vapor content, polarization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1 – Desvio do elétron devido a força coulombiana.....	18
Figura 1.1.2 – Esquema dos espectros da temperatura e o fluxo com a frequência.	21
Figura 1.2.1 – Des.....	22
Figura 1.2.2 – Desvio do elétron devido a força coulombiana.....	24
Figura 1.2.3 – Desvio do elétron devido a força coulombiana.....	25
Figura 1.3.1 – Ilustração da relação entre a opacidade e as janelas em rádio.	27
Figura 2.1.1 – Imagem do rádio telescópios POEMAS – CASLEO - Argentina.	34
Figura 2.3.1 – Imagem de uma estação da Rede AERONET.	37
Figura 3.1 – Exemplo de ajuste pelo método do qui-quadrado.....	39
Figura 3.2 – Exemplo de ajuste não aceito para composição do trabalho ..	41
Figura 3.3 – Exemplo de ajuste aceito para a composição do trabalho.	42
Figura 3.4 – Exemplo de gráfico da variação anual da opacidade em função do tempo para a frequência de 45 GHz - 2012.	43
Figura 3.5 – Exemplo de histograma com a distribuição das medidas de opacidade durante o ano para a frequência de 45 GHz - 2012.....	44
Figura 4.1.1 – Gráfico da variação anual da opacidade para a frequência de 45 GHz- 2012 ..	46
Figura 4.1.2 – Gráfico da variação anual da opacidade para a frequência de 45 GHz - 2013.....	47
Figura 4.1.3 – Gráfico da variação da opacidade e as estações do ano para a frequência de 45 GHz – 2012/2013.....	47
Figura 4.1.4 – Gráfico da variação anual da opacidade para a frequência de 90 GHz- 2012..	48
Figura 4.1.5 – Gráfico da variação anual da opacidade para a frequência de 90 GHz- 2013.	49
Figura 4.1.6 –Gráfico da variação anual da opacidade para a frequência de 45 GHz 2012/2013.....	49
Figura 4.1.7 –Histogramas da distribuição da opacidade para 2012, 2013 e 2012/2013 para 45 GHz.	50
Figura 4.1.8 –Histogramas da distribuição da opacidade para 2012, 2013 e 2012/2013 para 45 GHz.	51
Figura 4.1.9 – Gráfico da variação da mediana mensal para 2012/2013	52

Figura 4.1.10 – Gráfico da variação da média mensal para 2012/2013.....	53
Figura 4.1.11 – Relação entre a mediana e a média para 45 GHz para 2012/2013.	54
Figura 4.1.12 – Relação entre a mediana e a média para 90 GHz para 2012/2013.	54
Figura 4.1.13 – Gráfico da variação do PWV para 2012.....	55
Figura 4.1.14 – Gráfico da variação do PWV para 2013.....	56
Figura 4.2.1 – Relação da variação das medianas da opacidade entre 2012/2013..	60
Figura 4.2.2 – Relação da variação das médias da opacidade entre 2012/2013.....	61
Figura 4.2.3 –Gráfico da relação entre opacidades e ajuste entre 45 e 90 GHz para 2012	62
Figura 4.2.4 – Gráfico da relação entre opacidades e ajuste entre 45 e 90 GHz para 2013.	62
Figura 4.2.5 – Gráfico da relação entre opacidades e ajuste entre 45 e 90 GHz para 2012/2013	63
Figura 4.3.1 – Gráfico da distribuição de valores de PWV para 45 GHz – 2012/2013.	64
Figura 4.3.2 – Gráfico a distribuição de valores de PWV para 90 GHz –2012/2013.	65
Figura 4.3.3 – Histogramas da variação anual da opacidade para 45 GHz e 90 GHz para 2012/2013.	65
Figura 4.3.4 –Relação entre a opacidade e o PWV para 45 GHz – 2012/2013..	66
Figura 4.3.5 – Relação entre a opacidade e o PWV para 90 GHz – 2012/2013	66
Figura 4.3.6 – Gráfico da relação entre as opacidades de 45 e 90 GHz – 2012/2013	67
Figura 4.3.7 – Gráfico da relação entre as razões das opacidades 90/45 GHz - 2012/2013.	68
Figura 4.3.8 –. Gráfico da relação entre as razões das opacidades 45/90 GHz - 2012/2013..	68
Figura 4.4.1 –Variação entre a opacidade e o PWV – ATM - Verão.	74
Figura 4.4.2 –Variação entre a opacidade e o PWV – ATM – Temperatura média Verão.....	75
Figura 4.4.3 – Variação entre a opacidade e o PWV – ATM - Inverno.....	76
Figura 4.4.4 – Variação entre a opacidade e o PWV – ATM Temperatura média inverno.....	77
Figura 4.4.5 – Variação entre a opacidade e o PWV – ATM – Outono/Primavera	78
Figura 4.4.6 – Variação entre a opacidade e o PWV – ATM – Média de temperatura Outono/Primavera	80

Figura 4.4.7 – Relação entre frequência e opacidade – Espectro entre 10 e 100 GHz	
.....	81
Figura 5.1.1 – Relação entre frequência e opacidade – Espectro entre 10 e 100 GHz	
.....	86

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Variação dos horários de “tipping” durante 2012/2013.....	40
Tabela 4.1. – Variação da população de medidas	46
Tabela 4.2 – Valores das opacidades anuais para 2012, 2013 e 2012/2013 para as frequências de 45 GHz e 90 GHz.....	52
Tabela 4.3 – Valores da opacidade do verão para 2012, 2013 e 2013/2013	59
Tabela 4.4 –. Valores da opacidade do outono para 2012, 2013 e 2012/2013	60
Tabela 4.5 – Valores da opacidade do inverno para 2012, 2013 e 2012/2013.	61
Tabela 4.6 – Valores da opacidade do Primavera para 2012, 2013 e 2012/2013.....	61
Tabela 4.7 – Relação entre opacidades experimentais e a simulação ATM.	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CASLEO – *Complexo astronômico El Leoncito*

IDL – *Interactive Data Language*

POEMAS - *POlarization Emission of Millimeter Activity at the Sun*

PWV – *Precipitable Water Vapor*

ATM - *Atmospheric Transmission at Microwaves*

BIMA - *Berkeley-Illinois-Maryland Association Observatory*

OVSA - *Owens Valley Solar Array*

GHz – *Giga Hertz*

θ - *ângulo de espalhamento*

γ - *Fator de Lorentz*

S - *Fluxo*

B – *Brilhância*

dS – *Diferencial para o fluxo*

dA – *Diferencial para a área*

dz – *Diferencial para direção z*

I₀ – *Intensidade inicial*

I_s – *Intensidade final*

B – *Campo Magnético*

c – *Velocidade da luz*

e – *Elétron/carga do elétron*

T - *Temperatura*

τ - *Profundidade óptica*

κ_v - *Absorção do meio*

CNRS - *Centre National de Recherches Météorologiques*

LOA - *Laboratoire d'Optique Atmosphérique*

PHOTONS – *PHOtométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation
Satellitaire*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	<u>15</u>
1.1 Emissões solares no comprimento milimétrico.....	<u>17</u>
1.2 A profundidade óptica	<u>20</u>
1.3 A profundidade óptica e sua relação com o PWV	<u>25</u>
1.4 Métodos de medida da profundidade óptica.....	<u>27</u>
1.5 Objetivos	<u>29</u>
1.4 Justificativa.....	<u>30</u>
CAPÍTULO 2 - INSTRUMENTOS.....	<u>32</u>
2.1 POEMAS (POLarization Emission of Millimeter Activity at the Sun).....	<u>32</u>
2.2 Software ATM – <i>Atmospheric Transmission at Microwaves</i>	<u>34</u>
2.3 Rede AERONET	<u>37</u>
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	<u>38</u>
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DE DADOS	<u>45</u>
4.1 Análise anual.....	<u>45</u>
4.2 Análise sazonal	<u>59</u>
4.3 Relação entre a Opacidade e o PWV	<u>66</u>
4.4 Aplicação do programa ATM em El Leoncito	<u>72</u>
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	<u>83</u>
5.1 Conclusões.....	<u>83</u>
5.2 Perspectivas futuras.....	<u>86</u>
5.3 Agradecimentos finais.....	<u>87</u>
REFERÊNCIAS.....	<u>88</u>
ANEXO A	<u>92</u>

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O Sol é a estrela que aquece e permite a vida na Terra e rege uma série de fenômenos importantes para que ela continue existindo da forma que a conhecemos hoje. Ele possui ciclos de atividade, nos quais, se observa máximos e mínimos com relação a emissões de energia e partículas, apresentando uma série de fenômenos tais como: explosões solares, EMC's (ejeções de massa coronal) e erupções de filamentos por exemplo.

Ao ocorrer uma explosão solar, observamos um fenômeno que libera de forma repentina quantidades imensas de energia (podendo variar entre 10^{19} a 10^{25} J) que são emitidas ao espaço. O conhecimento dos processos que levam a essa liberação, bem como processos posteriores e de pré-emissão (Dulk,1985, Kundu,1965), sua transmissão no meio interplanetário e sua detecção aqui em nosso planeta, é de grande importância. Não somente pelo impacto que a energia e as partículas podem causar nos seres vivos aqui, mas também em nossa tecnologia.

O desenvolvimento do entendimento do que acontece no Sol como corpo astrofísico, serve de modelo para outros de sua classe espectral. Além disso, devido a sua constituição ser um plasma altamente aquecido com temperatura entre $4,5 \times 10^3$ a $1,5 \times 10^7$ K, dependendo da parte de sua atmosfera. Além dessas características, também é ionizado, principalmente nas regiões ativas, onde há maior concentração de plasma e partículas confinadas. Logo, ao observar seu comportamento e suas características, pode levar a uma maior compreensão desses fenômenos, visando assim, para um futuro não tão distante, aplicações tecnológicas na produção de energia limpa (Duarte, et. al., 2017).

Para entender esses comportamentos e mecanismos de emissão, precisamos muitas vezes nos servir de instrumentos que possam detectar os mais diferentes tipos de informações, de onde possamos extrair dados para sua melhor compreensão. Com a tecnologia que temos hoje, esses dados podem ser obtidos de diversos modos, tais como telescópios, radiotelescópios, sondas satélites etc.

O Sol emite em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, e dependendo do comprimento, podemos divisar partes diferentes de sua atmosfera (Dickinson, 1986).

Da superfície da Terra, devido sua atmosfera, podemos observar o Sol em faixas de comprimento de onda, chamadas de janelas, que incluem: o espectro visível (4×10^{-7} m a 7×10^{-7} m), algumas partes do infravermelho e das micro-ondas e janela rádio. Essa de grande importância, devido a sua transparência e sendo definida por comprimentos de onda que vão de 1 mm até 30 m.

No caso da janela rádio, o Sol exibe alguns comportamentos que são chamados de componentes. Essas componentes são classificadas como: componente calma, componente quiescente e componente perturbada. Dependendo da componente, temos modificações no comportamento das emissões devido a atividade solar (modificações no campo magnético, sua topologia e intensidade) e isso provoca alterações na temperatura, densidade de elétrons, na velocidade desses elétrons e no tipo de fenômeno físico responsável pela emissão rádio em determinada camada da atmosfera (Kundu, 1965, Dulk, 1985, Raulin, 2004).

Assim, no caso das explosões solares, que emitem radiação em uma grande faixa de frequências distintas e ocorrem de forma mais comum na componente perturbada, geram emissões desde frequências de rádio até os raios gama. Também gerando partículas, juntamente com a energia emitida com as explosões são detectadas desde frequências indicam a possibilidade e o início da explosão (fase precursora), bem como em suas fases impulsiva e gradual, que são as fases ligadas à emissão de energia e partículas, devido ao processo de reconexão magnética, e de decaimento após a explosão (Dulk, 1985).

Para ser possível medir da superfície da Terra e do espaço essas frequências e, com isso, dimensionar a quantidade liberada dessa energia em diversos fenômenos solares, temos que levar em consideração uma série de fatores que poderiam de certa forma impedir a sua correta mensuração.

Um desses fatores é a profundidade óptica, parâmetro o qual é a motivação desse trabalho. Após sua definição, obtenção de seus valores pelo método “tipping” e posterior análise estatística dos dados obtidos pelo conjunto de telescópios POEMAS (POLarization Emission of Millimeter Activity at the Sun – Valio, et. al.,2013), temos como fim, melhorar a caracterização desse parâmetro nas faixas de 45 e 90 GHz em El Leoncito (CASLEO) – observatório que se encontra a uma altitude de 2.550 m na Argentina, durante seu biênio de funcionamento entre 2012 e 2013, apesar de seu funcionamento ter ido desde 25 de novembro de 2011 até o final de 2013.

Portanto, dessa forma, nas seções que se seguem, vamos introduzir os conceitos sobre os processos solares observáveis na faixa milimétrica do espectro, o conceito da profundidade óptica e a transferência radiativa, os métodos de medição da profundidade óptica, sendo seguidas pelas seções do objetivo e justificativa desse trabalho. Continuando, temos o capítulo 2, em que iremos apresentar os instrumentos dos quais retiramos os dados, os telescópios POEMAS; depois, os capítulos 3 e 4, nos quais mostramos a metodologia utilizada para estudar a profundidade óptica e posterior análise para obtenção de seu valor para o local de estudo e, por fim, no capítulo 5, as conclusões que obtivemos até o momento, as perspectivas futuras e agradecimentos finais.

1.1 Emissões solares em comprimentos milimétricos

Da Terra podemos observar o céu em diversos comprimentos de onda em rádio. Porém quando o fazemos em ondas milimétricas o Sol desponta como um dos objetos mais brilhantes (Wedemeyer, S. et al., 2016.; White, S. M. and Kundu,1992). Portanto, entender o que acontece no Sol nesses comprimentos de onda é de grande importância não somente para conhecer o Sol como estrela que é centro de nosso sistema, mas também utilizar o conhecimento obtido através dele, como guia para o entendimento do que ocorre em outras fontes.

Nos estudos realizados sobre o comportamento do Sol em ondas milimétricas (Wedemeyer, S. et al., 2016.; White, S. M. and Kundu,1992, Penzias, A. A.; Burrus, 1973, Correia, et. al.,1994), as quais implicam em emissões que variam entre 20 e

100 GHz, podem ser em geral, decorrência de dois mecanismos de emissão distintos. Um mecanismo que resulta da interação dos elétrons térmicos com as partículas carregadas da atmosfera solar, que aparece mais na fase gradual da explosão, e após em geral do pico dela. E outro mecanismo, que é devido à aceleração de elétrons não térmicos que giram ao redor das linhas de campo magnético dos arcos, ocorrendo em geral na fase inicial e tem características impulsivas (Ramaty et. al., 1994; Raulin et. al., 2004; Altyntsev et. al., 2008).

O Bremsstrahlung térmico é um dos mecanismos dominantes durante a componente calma para o comprimento de ondas milimétricos, continuando ativo durante a fase precursora e na fase gradual, depois da explosão. Isso ocorre devido as colisões que são o resultado da ação da força coulombiana entre os elétrons livres e íons presentes no plasma solar. As colisões de longo alcance que causam pequenas deflexões são mais importantes para o aquecimento do plasma, e podem provocar possíveis emissões, em detrimento às colisões de pequeno alcance que em geral produzem grandes desvios (Dulk,1985). Todo esse processo altera a velocidade do elétron e sua direção de movimento como é mostrado na figura 1.1.1:

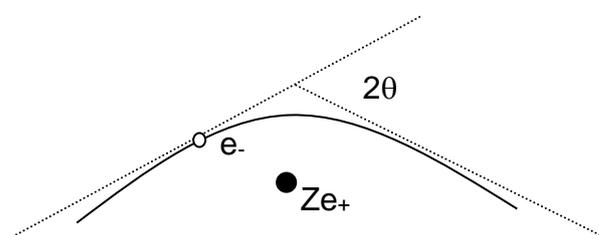


Figura 1.1.1 – Desvio do elétron - íon devido a força coulombiana.

Durante uma explosão solar, o plasma da coroa se aquece muito, tendo sua densidade aumentada. Se essa temperatura aumentar acima de 10^6 K e podendo alcançar valores maiores que 10^{12} K, esse mesmo plasma irradiará também, comprimentos de onda milimétricos devido ao mecanismo de bremsstrahlung da componente opticamente fina, além de raios X moles (White, S. M. e Kundu,1992).

A segunda forma de emissão em comprimentos milimétricos é a giro-emissão, que acontece na presença de campos magnéticos. A giro-emissão é resultado da força de Lorentz sobre os elétrons presentes no plasma. Conforme o

elétron se movimenta de forma helicoidal ao redor das linhas de campo magnético, ele emite radiação. Essas emissões se dão como múltiplos inteiros do valor de giro-frequência dos elétrons. Se a expressão para a frequência do elétron sob a ação da força de Lorentz for dada pela expressão:

$$f_B = \frac{\Omega_e}{2\pi} = \frac{e|B|}{2\pi m_e c} \approx 2,8 \times 10^6 |B| \text{ Hz} \quad (1)$$

Onde Ω_e é a frequência de giro fundamental do elétron, e é a carga do elétron, m_e é a massa do elétron e c a velocidade da luz no vácuo, teremos três situações possíveis para o movimento dos elétrons, classificados de acordo com sua velocidade:

- Elétrons não relativísticos – γ (fator de Lorentz) ~ 1 – cíclotron.
- Elétrons moderadamente relativísticos – $1 < \gamma < 5$ – giro síncrotron.
- Elétrons Relativísticos - $\gamma > 5$ – síncrotron.

No caso das emissões em comprimentos milimétricos em geral, só se observam giro-emissões que são devidas a elétrons relativísticos (White, Kundu, 1992) e são observadas geralmente em grandes explosões, sendo emitidos na sua fase impulsiva, mas também podem ocorrer em eventos com energia menores (Raulin et. al., 1999). No caso das emissões ciclônicas, os elétrons quando acelerados, não emitem em harmônicos que sejam suficientemente altos para serem observados na faixa entre 1 e 3 mm.

Na figura 1.1.2, temos exemplos esquemáticos da relação do espectro da temperatura de brilho e a densidade de fluxo, nos quais estão representadas as giro-emissões. Não aparecem nessa figura as relações do bremsstrahlung térmico, que apresenta uma forma de platô seguido de uma inclinação negativa para a relação do log da temperatura de brilho em função do log da frequência e, no caso do log do fluxo em função do log da frequência, se observa uma inclinação positiva seguida de um platô, conforme é possível ver em Dulke, 1985, fig. 2, p. 175.

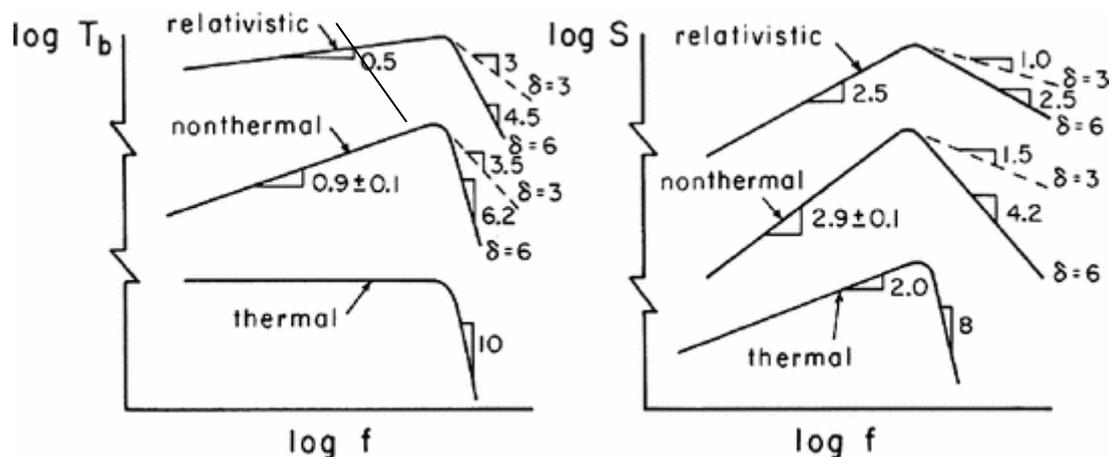


Fig. 1.1.2 Esquema de espectro da temperatura de brilho e a densidade de fluxo com relação a frequência de emissão. Fonte: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-2869-4_2

Assim, antes do funcionamento do POEMAS havia poucos telescópios (Nobeyama, BIMA e OVSA) fazendo o patrulhamento do Sol de forma constante e diária na faixa de frequências milimétricas, o que implicava em várias dificuldades na diferenciação dos dois tipos de emissão entre si.

Portanto, com o aumento do monitoramento na faixa milimétrica com o funcionamento do POEMAS, que foi instalado para patrulhar exclusivamente o Sol, se esperava encontrar maior quantidade de dados e valores que permitissem saber a verdadeira inclinação do espectro na componente opticamente fina, que implicaria na diferenciação desses dois tipos de emissão, bem como, a lei de potência que rege o fenômeno.

1.2 A profundidade óptica

Ao atravessar a atmosfera terrestre (e solar), as ondas eletromagnéticas sofrem uma atenuação na sua amplitude ao se propagarem entre os diversos meios até a antena receptora. Tal fato implicará em uma variação no brilho, fluxo e na temperatura medidas pelo instrumento, que na realidade são aparentes. Necessitamos, então, de uma relação entre os valores reais e os aparentes de forma a corrigir a medida instrumental e nos dar o real valor do fenômeno observado.

Nesses casos, são utilizadas as equações da transferência radiativa para obter as devidas correções sobre o brilho, fluxo e a temperatura. Dessa forma, ao se aplicar a equação da transferência radiativa dentro de uma nuvem (que em nosso caso seria a atmosfera terrestre), que apenas absorva a radiação emitida pela fonte em uma dada direção, que pode ser qualquer uma do espaço (x , y ou z), observaremos certa atenuação α por unidade de comprimento, que é a constante de atenuação do meio.

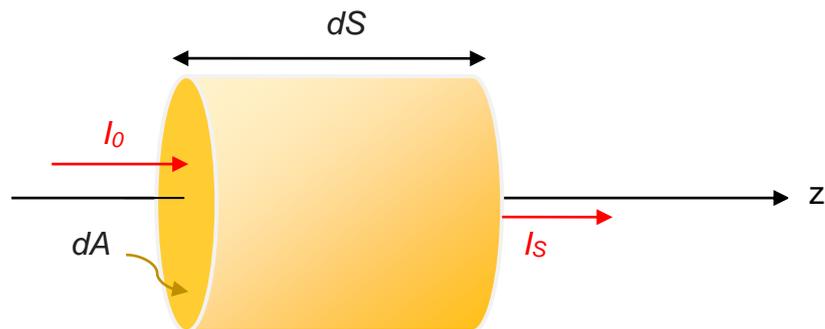


Fig. 1.2.1 Caracterização para solução infinitesimal da equação da transferência radioativa dentro do volume de um cilindro infinitesimal.

Logo, a energia que a onda transporta será tratada como densidade de fluxo S atenuando-se ao atravessar o meio. Supondo que a onda, ao atravessar o meio, o faça na direção de z , ao se propagar através do elemento infinitesimal dz , terá um decréscimo no fluxo dado por:

$$dS = -S\alpha dz \quad (2)$$

Onde, se integrarmos no caminho em linha reta do interior da nuvem:

$$\int_0^{S_0} \frac{dS}{S} = - \int_0^{z_0} \alpha dz \quad (3)$$

Solucionando essas integrais, e fazendo $z = 0$ e $S = S_0$ teremos:

$$S = S_0 e^{-\alpha z_0} \quad (4)$$

E se fizermos $\tau = \alpha \cdot z_0$, define-se a *profundidade óptica* do meio absorvente por:

$$\tau = \int_0^{z_0} \alpha dz \quad (5)$$

ou

$$\tau = \ln \frac{S_0(z=0)}{S(z=z_0)} \quad (6)$$

Da mesma forma, pode-se chegar a equações do Fluxo dado pela expressão (7), para o Brilho, que no caso é a expressão (8), e para equação da Temperatura da fonte real (equação 9) :

$$S = S_0 e^{-\tau} \quad (7)$$

$$B = B_0 e^{-\tau} \quad (8)$$

$$T = T_0 e^{-\tau} \quad (9)$$

Adotando-se a atmosfera como plano-paralela, e que, para a faixa de frequências mm e submilimétricas podemos aplicar a aproximação de Rayleigh – Jeans para radiação de corpo negro, nesse caso, como o brilho é proporcional à temperatura, chega-se à equação onde se relaciona a temperatura e a profundidade óptica (Kraus, 1986; Kundu,1965):

$$T_{obs} = T_{sky} \left(1 - e^{-\tau / \sin \xi} \right) - T_{off} \quad (10)$$

Onde T_{obs} é a temperatura obtida pelo aparelho, ou seja, temperatura de brilho obtida para aquela elevação ξ pelo radiômetro. T_{sky} é a temperatura média do céu fora da fonte, ou seja, a temperatura da atmosfera (que no caso da rotina de

redução de dados era de 273,18 K) e, T_{off} é a temperatura de “offset”, que se trata da temperatura produzida pelos instrumentos durante seu funcionamento e que deve ser subtraída para se obter o valor observado corrigido. Por fim, ξ é o ângulo de elevação. Gerando um ajuste da forma como é visto na fig. 1.2.2:

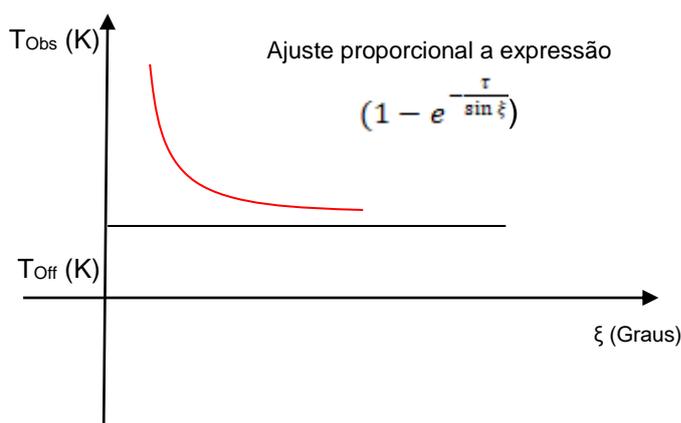


Fig. 1.2.2 – Gráfico simplificado da temperatura em função da elevação e ajuste (em vermelho). (Da autora)

Assim, a profundidade óptica pode ser calculada de forma teórica ou de forma experimental, conforme veremos na seção 1.4. De forma teórica, podemos ver em Kraus (Kraus, 1986), que a opacidade depende da absorção κ_v do meio ao qual ela atravessa. Essa absorção é dependente da frequência que atravessa a nuvem com relação aos seus constituintes, que para a Terra, é a atmosfera até 10 km, pois acima disso, podem ser desprezados os efeitos de opacidade.

Portanto, se admitirmos que a atmosfera é plana, podemos assumir que o valor da absorção κ_v é constante ou aproximadamente constante. Então, podemos dizer que a profundidade óptica é dada pela expressão $\tau = \kappa_v \cdot L$. Onde L é a distância entre o receptor (antena) e o emissor (o Sol ou outra fonte), e dessa forma, teremos a seguinte configuração, em relação a um ângulo de elevação ξ de observação:

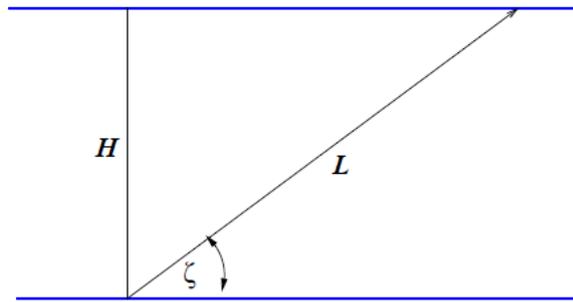


Figura 1.2.3 - Modelo de atmosfera plano-paralela para o cálculo da profundidade óptica em relação a direção ξ . Fonte: Apostila de RC do Prof. Dr. C. G. Giménez de Castro

Onde:

$$L = \frac{H}{\sin \xi} \quad (11)$$

E assim, podemos reescrever a equação como:

$$T_v(\xi) = K_v \cdot L = \frac{K_v \cdot H}{\sin \xi} = \frac{\tau(90^\circ)}{\sin \xi} = \frac{\tau_v}{\sin \xi} \quad (12)$$

Chegando assim à expressão para a transmissão atmosférica (12), e da emissão do céu (13) ficam determinadas por:

$$T(\xi) = e^{-\frac{\tau_v}{\sin \xi}} \quad (13)$$

$$I_v^c(\xi) = B_v^p(T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau_v}{\sin \xi}}\right) \quad (14)$$

Onde ao se aplicar à equação (14) a condição de Rayleigh–Jeans para radiação de corpo negro, teremos que nesse caso, o brilho é proporcional à temperatura e acabamos por ter a equação (10).

1.3 A profundidade óptica e sua relação com o PWV

No caso da atmosfera terrestre, a atenuação atmosférica dependerá de vários fatores como: a frequência da radiação incidente, da composição de gases e da densidade nas diferentes altitudes da atmosfera, ângulo de incidência, condições do clima local e global, por exemplo.

A literatura indica que as observações na superfície da Terra dependem desses parâmetros, mas que, para o caso de serem feitas em comprimentos de ondas milimétricos, irão depender fortemente dos componentes atmosféricos como o vapor de água. Assim, para esses comprimentos de onda, têm-se pequenas janelas onde a atenuação, tem seus efeitos diminuídos, mas ainda dependentes das condições do relevo, clima e condições globais da distribuição do vapor de água (Gionanelli, et. al., 2001; Otárola et. al.,2010).

A seguir, na figura 1.3.1, temos uma ilustração que mostra a relação entre a opacidade (profundidade óptica) com relação ao comprimento de onda e a composição atmosférica:

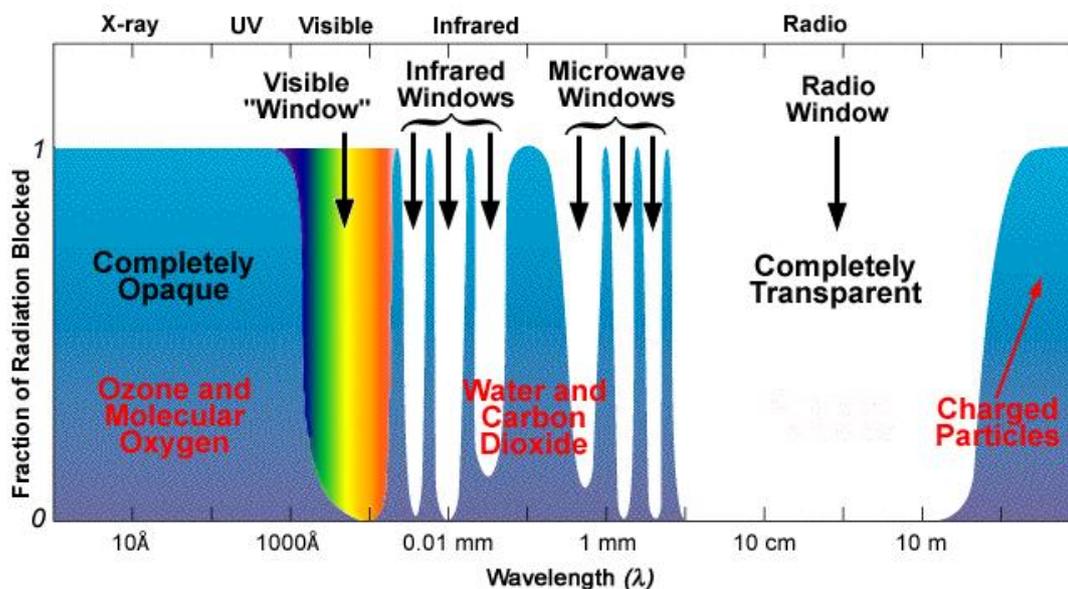


Figura 1.3.1 – Relação entre a fração da opacidade e as diversas janelas de comprimentos de onda e seus principais componentes absorvedores. <https://christinatang1992.wordpress.com/tag/wavelength/>

O PWV (Precipitable Water Vapor) é definido como a quantidade de água líquida que seria obtida se todo o vapor na atmosfera em uma dada coluna sobre o local de estudo fosse condensado (A. Deepak, T.D. Wilkerson, and L.H. Ruhnke, 1980). Existem várias formas para a sua medição tais como: uso de sondas atmosféricas, higrômetros, detecção da emissão de objetos astronômicos e emissão da atmosfera. Uma das técnicas para se relacionar o PWV e a profundidade óptica pode ser obtida através de técnicas de radiometria. No caso dos comprimentos milimétricos e sub-milimétricos, temos como exemplo os trabalhos de Westwater, (Westwater, 1978), Cornejo Espinoza (Cornejo Espinoza, 2017) e Cassiano (Cassiano et.al., 2018).

Assim, os principais fatores de atenuação atmosférica para os comprimentos de onda na faixa milimétrica são o oxigênio e o vapor de água. Como a quantidade de oxigênio é relativamente constante durante o tempo, o PWV e a as suas possíveis variações dependentes do clima e de suas variações sazonais, acabam por ser um fator de grande contribuição para o aumento da opacidade (Han, Westwater, 2000; A. Deepak, T.D. Wilkerson, and L.H. Ruhnke, 1980; Ulich, 1980). Ao se construírem os telescópios POEMAS, suas frequências (45 e 90 GHz) foram escolhidas para janelas com menor atenuação atmosférica devido as condições

climáticas de El Leoncito e para o monitoramento de uma faixa do espectro que era pouco explorado.

Também, existem simuladores como *ATM – Atmospheric Transmission at Microwaves* (Pardo, Cernicharo, Serabyn, 2001), que realizam a simulação para os valores da opacidade através da entrada de diversos parâmetros tais como: altitude, temperatura, pressão atmosférica, frequência e o também o PWV. O ATM se utiliza da equação da transferência radiativa e um modelo (U.S.1962 Standart Model) para a composição da atmosfera e a sua proporção dos diversos elementos atenuadores (oxigênio, vapor de água e água, entre outros).

1.4 Métodos de medida da profundidade óptica

Existem três métodos experimentais de se medir a profundidade óptica, que tem suas unidades de medida em Nepers (Np) ou em Decibéis (dB). São consequência de aplicações da equação da transferência radiativa sob as condições de Rayleigh–Jeans e supondo a atmosfera como plano-paralela. São eles:

- Método Absoluto
- Método da Brilhância do Sol
- Método “tipping”

O Método Absoluto se utiliza das diferenças entre as medidas obtidas dos sinais de observação de duas fontes (o Sol – quente e o céu, fria) de duas varreduras consecutivas medidas para ângulos de baixa elevação (fig. 4 em Melo, et al.,2003). A medida da profundidade óptica (que supostamente é constante entre os dois mapeamentos) é obtida através da equação (Melo, et al.,2005):

$$\tau = \frac{\ln \left(\frac{ADC_1}{ADC_2} \right)}{\left(\frac{1}{\sin \xi_1} \right) - \left(\frac{1}{\sin \xi_2} \right)} \quad (15)$$

Onde ξ_1 e ξ_2 são os ângulos de elevação e ADC_1 e ADC_2 são as diferenças dos sinais encontrados entre as fontes fria (o céu) e a fonte quente (o Sol) durante

as varreduras consecutivas. Mas, nesse método há algumas limitações. Uma delas é a dificuldade de se fazer medições consecutivas para ângulos de baixa elevação próximos entre si. E se reside no fato que, se as condições de atenuação forem muito grandes para duas elevações consecutivas à baixa elevação, as temperaturas medidas pela antena podem implicar em variações muito pequenas, o que implicaria no aumento de erros experimentais nas medidas.

No caso do método da Brilhância, que, em comparação aos outros métodos, permite calcular valores mais altos da profundidade óptica, e relaciona a diferença de temperatura da antena entre o céu e o Sol durante uma varredura em uma certa elevação ξ , conforme a equação que se segue:

$$\Delta T_{ant} = \eta T e^{\frac{-\tau}{\sin \xi}} \quad (16)$$

Sendo ΔT_{ant} a diferença da temperatura da antena (entre o céu e o Sol), η a eficiência do feixe do telescópio, e por fim, T a temperatura de brilho do Sol (Melo, et al., 2005). Como o produto ηT é constante, o valor da opacidade pode ser obtido pela solução da equação:

$$\tau = \sin \xi \cdot [\ln(\eta T) - \ln(\Delta T_{ant})] \quad (17)$$

Para terminar essa seção, apresentaremos o método “tipping”, também conhecido método de varredura do céu, consiste no cálculo da profundidade óptica a partir da temperatura do céu e o ângulo de elevação ξ , para pelo menos para duas elevações.

Sendo que, o valor da profundidade óptica é calculado ao se ajustar a melhor curva proporcional à expressão:

$$T_{obs} = T_{sky} \left(1 - e^{-\tau / \sin \xi} \right) - T_{off} \quad (18)$$

através dos valores da temperatura do céu medida pela antena durante um “scan” (fora da área do Sol) pela elevação (ver fig. 1.2.2).

Este método une o sistema de radiômetros com a teoria da transferência radiativa e as condições atmosféricas. Os valores de opacidade obtidos por esse

método são muito bons para valores de $\tau < 0,1$ Np. Além de ser rápido, pois a varredura é feita em poucos segundos.

O ajuste foi obtido através de um software próprio desenvolvido para o POEMAS, e a partir de suas 4 medições diárias (varreduras) eram obtidas as temperaturas observadas pelo aparelho e os ângulos de elevação da rotina.

As varreduras ocorriam em diversos horários de um mesmo dia (horários esses que variavam sazonalmente, pois a elevação inicial de 10° é dependente da estação do ano) e eram pré-programadas por um software que acompanhava o POEMAS. Assim, em dado o horário pré-programado, era iniciado a varredura que tirava o POEMAS de seu apontamento para o Sol, o direcionava para o céu, e para elevações que começavam a 10° , subindo automaticamente, sem interrupções e realizando a varredura até o zênite, marcando as temperaturas do céu (T_{Obs}) para valores de intervalos a cada 10° e depois, acabado o scan, voltava seu apontamento para o Sol. Tais valores eram dispostos em um arquivo nomeado com ano, mês, dia da medida e seu horário e arquivados em um servidor.

1.5 Objetivos

1. Determinar a profundidade óptica para as frequências de 45 e 90 GHz através do método “tipping” com os dados obtidos através dos telescópios POEMAS através de um estudo estatístico de seus valores para a mediana e para a média.
2. Caracterizar os valores encontrados para a profundidade óptica em diversas épocas do ano e horários durante os anos de operação.
3. Relacionar as profundidades ópticas entre as duas frequências através de uma equação de correlação.
4. A partir dos valores de PWV da rede AERONET do local relacionar as profundidades ópticas obtidas para as duas frequências de operação do POEMAS e os PWV durante o tempo de funcionamento.
5. Encontrar as relações entre a opacidade e o PWV para as frequências de 45 GHz e 90 GHz.

6. Comparar os valores encontrados com o método estatístico com o resultado obtido através de uma simulação utilizando o software ATM, que é um programa que determina a profundidade óptica através de uma simulação computacional.

1.6 Justificativa

O estudo da opacidade atmosférica tem grande importância dentro da radioastronomia pois, é um parâmetro de correção na amplitude da emissão eletromagnética (que pode vir do Sol ou de outra fonte) ao se propagar nos diversos meios até a antena receptora. Tal fato implicará em uma variação no fluxo, brilho e temperatura, que podem ser medidas pelo instrumento em questão. Assim, conhecendo-se o valor de atenuação em determinada localidade, pode-se fazer as devidas correções para obtenção dos valores experimentais de forma mais precisa, e assim, ter melhor compreensão dos diversos fenômenos estudados. Portanto, ao se conhecer melhor a opacidade, podemos estimar a radiação emitida pelo objeto, como se ela fosse medida fora da atmosfera.

No caso das emissões possíveis de serem observadas pelas frequências de funcionamento do POEMAS, que se encontram na faixa milimétrica do espectro, podemos obter um melhor estudo do comportamento da cromosfera solar (região da atmosfera solar entre a fotosfera e a coroa), sua estrutura, densidade eletrônica, intensidade de campo magnético em componentes perturbadas e diferenciar as possíveis emissões que daí são decorrentes durante as diversas componentes solares.

Devido a atenuação, no caso das frequências milimétricas; o valor da opacidade pode variar muito com a quantidade de vapor de água no local. Portanto conhecer o comportamento da profundidade óptica, seus valores para a mediana e a média, bem como sua variação sazonal, é motivo de estudo antes da escolha do local para a implantação de um radiotelescópio na faixa de rádio (Otárola et. al.,2010).

Na literatura já existem algumas medidas da opacidade para o POEMAS. São os valores obtidos durante os quatro dias de sua calibração inicial (23 a 26 de

novembro de 2011, Valio et. al., 2013) que foram encontrados através de uma rotina *tipping* e posterior ajuste computacional. Sendo que os valores encontrados foram de 0,03 a 0,08 Np para a frequência de 45 GHz e de 0,02 a 0,06 Np para a frequência de 90 GHz. Também há um segundo estudo onde os valores foram obtidos através de uma análise estatística inicial. Os valores encontrados para a média foi de $0,077 \pm 0,011$ Np para a frequência 45 GHz e $0,11 \pm 0,03$ Np para a frequência de 90 GHz (Tendolini, 2014).

Dessa forma, devido aos argumentos descritos acima, justifica-se esse trabalho, pois o valor da profundidade óptica em El Leoncito para o POEMAS ainda não foi suficientemente explorada, bem como suas possíveis variações sazonais. Além disso, também requerem um melhor tratamento a relação da profundidade óptica e o PWV local durante o biênio de operação do POEMAS para as frequências de 45 e 90 GHz, a relação entre as suas duas frequências de operação entre si e o melhor entendimento do porquê os valores da opacidade de 45 GHz são maiores que os encontrados para 90 GHz, se de acordo com a literatura se espera o contrário (Hiriart et. al., 1997).

Capítulo 2

INSTRUMENTOS

2.1 POEMAS (POLarization Emission of Millimeter Activity at the Sun)

POEMAS foi o nome dado para os dois polarímetros solares que estavam situados no Observatório CASLEO na Argentina, e era um acrônimo para POLarization Emission of Millimeter Activity at the Sun. Estão situados a uma altitude de 2.550m onde, as condições atmosféricas e climáticas são favoráveis devido à baixa precipitação, para as observações na faixa de comprimento de ondas milimétricas.

Foi concebido para medir as duas componentes de polarização circular da radiação solar para as frequências de 45 e 90 GHz. Construído pela empresa alemã RPG, foi colocado em operação em 22 de novembro de 2011, funcionando até o final de 2013.



Figura -1.1.1 - Rádios polarímetros solares POEMAS – localizados no CASLEO, Argentina (Valio, et.al.,2013)

Constituído de quatro radiômetros, sendo que, dois são para o patrulhamento do Sol para observação da polarização circular das componentes direita e esquerda para a frequência de 45 GHz, e a mesma configuração para 90 GHz (Valio, et.al.,2013).

O valor do HPWV (potência a meio feixe) para a frequência de 45 GHz era de 1.03° e para 90 GHz de 1.4° . Devido às suas configurações de construção, contava com amplificadores que possuíam “bandwidths” de 4 GHz, não necessitando de misturadores e osciladores para conversão do sinal, sendo possível para essa configuração, uma medida direta do evento (Valio, et.al., 2013).

As formas dos feixes de ambas as frequências eram praticamente gaussianas, ou seja, podia-se ajustar ao corte longitudinal do lóbulo principal do POEMAS a uma função gaussiana. Os valores da eficiência de abertura dos radiotelescópios eram de $50\pm 5\%$ para frequência de 45 GHz and $75\pm 8\%$ para a frequência de 90 GHz (Valio, et. al., 2013).

Os radiômetros do POEMAS possuíam uma resolução temporal de 10 ms tanto para 45 GHz quanto para 90 GHz. Tinham uma sensibilidade dentro de um intervalo de 2 a 4 K, o que resultava em uma sensibilidade variando de 4×10^4 a 20×10^4 Jy ($1 \text{ Jy} = 10^{-4} \text{ SFU}$ – Solar Flux Unit) (Valio, et.al., 2013).

Dessa forma, o POEMAS permite fazer patrulhamento solar contínuo e medir a polarização, tanto a direita quanto a esquerda, em suas ambas as frequências, para uma faixa de operação, na qual há poucos radiotelescópios patrulhando de forma contínua o Sol.

A redução de dados obtidos de possíveis emissões ou da rotina de medição da opacidade (realizada quatro vezes ao dia) eram feitas por programas desenvolvidos pela própria equipe do CASLEO/CRAAM em formato IDL. No caso do ajuste do método tipping para a obtenção da opacidade, as rotinas de abertura e leitura do arquivo com as medidas do tau, o ajuste (pelo método dos mínimos quadrados), a determinação do valor da opacidade, valor do χ^2 do ajuste e posterior saída foram idealizadas pelo Prof. Dr. Carlos Guillermo Giménez de Castro.

2.2 ATM – Atmospheric Transmission at Microwaves

O software ATM - Atmospheric Transmission at Microwaves consiste em uma série de rotinas, que através da equação da transferência radiativa e do modelo atmosférico U.S. 1962 Standart 45D N de latitude, e retorna a emissão térmica e a absorção total de vapor de água e de O₂ da atmosfera. Calcula os valores de emissividade e opacidade através de estimativas para frequências até 1000 GHz (Pardo, Cernicharo, Serabyn, 2001). Sendo que esse intervalo pode ser ampliado em algumas condições muito específicas e para locais muito secos, até 10 THz.

Os cálculos são realizados linha-a-linha da absorção usando uma linha de dados gerada a partir das constantes espectroscópicas disponíveis no modelo para todas as espécies atmosféricas que fazem parte dele.

Assim, o ATM tem como principal objetivo fazer uma simulação da região milimétrica/submilimétrica do espectro. Tais simulações devem ser acessíveis de medidas desde solo até vários quilômetros de altitude.

No caso dos alargamentos de linha devido a colisões, (os alargamentos são perturbações causadas nos níveis de energia de uma molécula, devido a interação com outras moléculas, átomos ou íons que colidem ou passam próximo, e podem induzir a molécula a absorver comprimentos de onda diferentes dos usuais), seus

valores são obtidos através de dados provenientes de laboratórios. E como abaixo dos 30 km, na atmosfera da Terra, temos que a largura das linhas de absorção é bastante determinada pelo alargamento devido a colisões, todas as linhas de H₂O de até 10 THz foram incluídas para contabilizar corretamente toda a opacidade da asa distante abaixo de 2 THz .

Os atrasos de fase próximos às ressonâncias H₂O e O₂ que também são importantes para a astronomia terrestre, devido ao fato de afetarem a fase interferométrica também são levados em consideração. Como a função de atraso de fase é dependente da frequência e está formalmente relacionada ao formato da linha de absorção através da teoria da dispersão de Kramers-Kronig, que é uma técnica de análise espectral baseada na possibilidade que para descrever uma propriedade óptica, pode-se usar uma função complexa analítica que respeite o princípio da causalidade para sua descrição

Assim, o pacote de software ATM foi desenvolvido para fornecer aos pesquisadores de radioastronomia um instrumento atualizado para calcular o espectro atmosférico em condições de céu claro, o qual pode ter várias aplicações, entre elas a medida da opacidade. Portanto, pode ser utilizado para fornecer simulações detalhadas de transmissão atmosférica e dispersão de fases para vários locais adequados para a astronomia submilimétrica.

No caso específico desse trabalho foi usada a versão V.1 J. Cernicharo de 31 de maio de 1993. Sendo assim, além do O₂ e do vapor de água, usa componentes de menor proporção na atmosfera tais como SO₂, N₂O, SO₂, SH₂, ClO e NO; bem como isótopos de O₂ e O₃. Disponibiliza também adaptações do modelo para as estações do verão e para o inverno estações do ano, porém não faz diferença entre primavera e outono.

Como funciona em dois modos, um deles (modo FREQ) determina a absorção atmosférica e a emissividade dada a frequência que se deseja estudar e outro (modo SPEC), que a partir de dois valores de frequência, retorna o espectro atmosférico para aquele intervalo. Em ambos os casos, pode-se variar parâmetros como altitude, PWV, umidade relativa, massa de ar sobre o local, temperatura, pressão atmosférica, escala de altura do vapor de água e modificar os vários componentes atmosféricos disponíveis no modelo. Tais alterações visam aproximar modelo usado pelo programa às condições da localidade.

2.3 Rede AERONET

A rede AERONET (AErosol RObotic NETwork) é um programa que fornece um banco de dados de domínio público de longo prazo, contínuo e acessível de vários tipos de parâmetros para pesquisa e caracterização de aerossóis

É um programa no qual há uma rede de sensoriamento remoto de aerossóis, que é estabelecida pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) e LOA-PHOTONS (CNRS)¹. Sendo largamente utilizada por colaboradores de agências nacionais, institutos, universidades, cientistas individuais e parceiros.

A rede AERONET fornece observações distribuídas globalmente de profundidade óptica espectral de aerossol (AOD), e vários outros produtos, entre eles o PWV utilizado nesse trabalho. Os dados de profundidade óptica do aerossol são calculados para três níveis de qualidade de dados e para esse estudo foi utilizado o Nível 2.0.

Cada uma das estações da rede é composta por um fotômetro solar multibanda CIMEL Electronique CE318 ou CE318-T (novo modelo usado a partir de 2014) que realiza medições da radiância do céu, irradiância espectral do Sol, e o novo modelo, também mede a irradiância noturna. É basicamente composto por uma cabeça sensora equipada com colimadores de 25 cm que é presa a uma base de 40 cm que aponta sistematicamente para o Sol, o céu e a lua de acordo com uma rotina pré-programada. Faz parte do conjunto uma unidade de controle Cimel, as baterias e o equipamento de transmissão via satélite Sutron conforme vemos na ilustração da foto a seguir.

¹ LOA - *Laboratoire d'Optique Atmosphérique*

PHOTONS - *PHOtométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire*

CNRS - *Centre National de Recherches Météorologiques*



Figura 2.3.1 Imagem de uma estação da Rede AERONET e seus componentes. Disponível em https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/system_descriptions.html

Capítulo 3

METODOLOGIA

Para a análise da profundidade óptica no CASLEO, usou-se os dados obtidos pela medida do método “tipping” do aparelho. Realizava as medidas de temperatura através da varredura contínua desde 10° até o zênite. Dessa forma, os polarímetros saíam do apontamento para o Sol e apontavam para uma direção no céu, procedendo o “tipping” e armazenando a temperatura do céu em um arquivo da medida. Conforme o procedimento era feito, eram armazenadas as temperaturas do céu a cada 10° partindo de 10° e indo até 90° . Esses dados eram armazenados conjuntamente com a os dados da polarização, temperatura efetiva, o valor da opacidade para 45 GHz e o χ^2 do ajuste para 45 GHz, opacidade de 90 GHz e χ^2 do ajuste de 90 GHz. Sendo que, somente as temperaturas e suas respectivas elevações eram utilizadas para o ajuste da curva da equação (17). O programa realizava um ajuste através de do método dos mínimos quadrados obtendo-se um gráfico de como o mostrado a seguir (fig. 3.1.) para as duas frequências e seu χ^2 (medida do ajuste) correspondente:

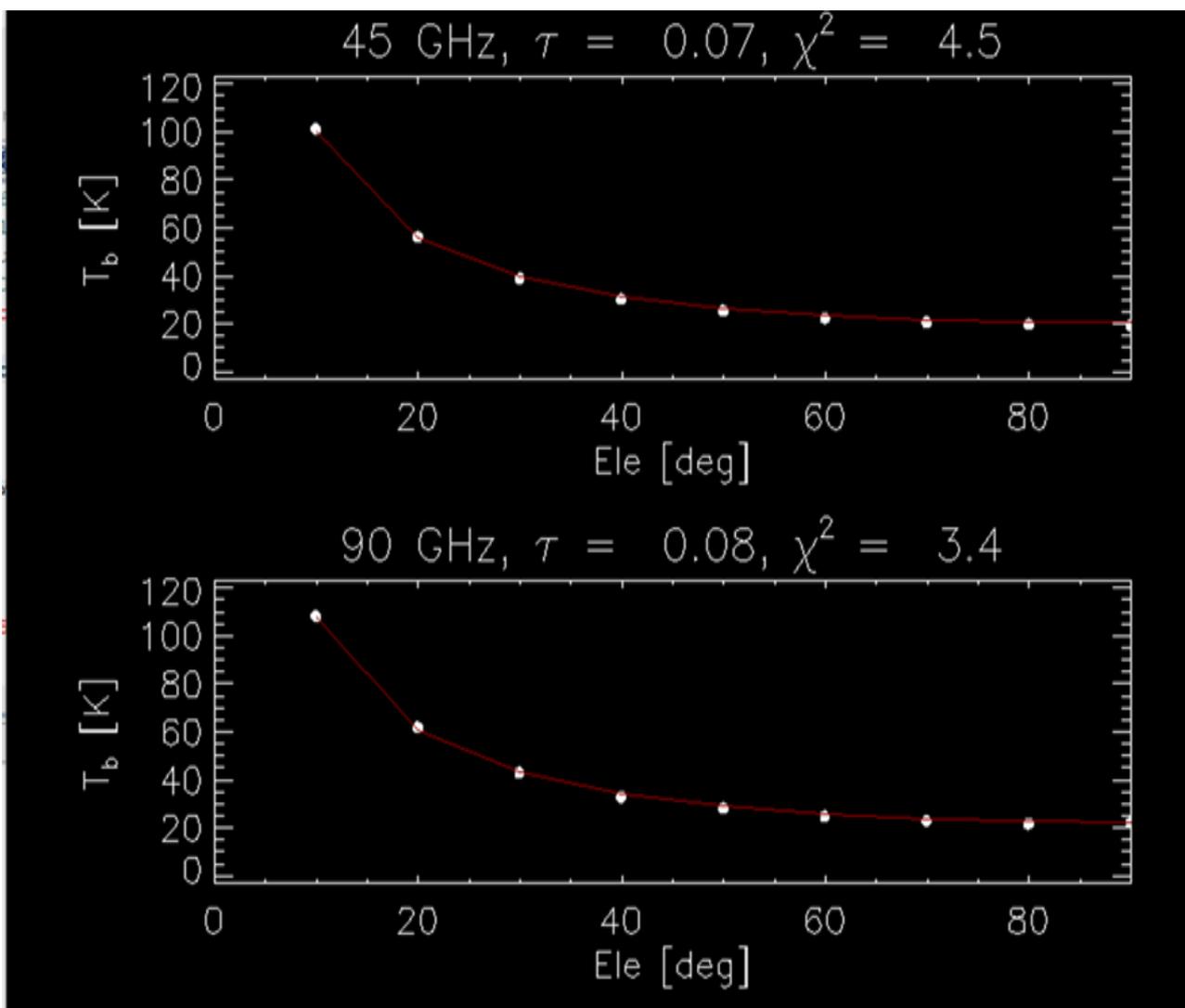


Figura 3.1 – Exemplo de saída do ajuste pelo método do qui-quadrado através da rotina IDL. (da autora).

Como dito anteriormente, o resultado da medida era arquivado com a data e a hora e ficava disponível em uma rede. Sendo parâmetros livres para o ajuste a T_b que era igual a T_{obs} na equação (18), bem como a elevação. Sendo T_{sky} sendo um dado de entrada fixo em um dos programas usados para o ajuste, bem como T_{off} .

Os telescópios faziam quatro medições diárias e seu horário de início da medição dependia da posição do Sol a partir de 10° com o horizonte. Dessa forma, tínhamos medidas que se iniciavam às 11:00 UT, e ocorriam depois às 13:00 UT, 15:00 UT, e 17:00, entre janeiro e fevereiro de 2012 e de 2013. Mas devido a mudança da posição de 10° com o horizonte variar durante o ano, há para cada um dos horários de medida, uma variação de 2 horas, o que acaba por se estender para

os outros horários consecutivos. Portanto, para facilitar a visualização das modificações durante o ano, dispomos essa variação anual na tabela 3.1.

Variação dos horários de “tipping” para o ano de 2012 e 2013

Meses	Janeiro, 2012	Feveiro, 2012	Março, 2012	Abril, 2012	Mai, 2012	Junho, 2012	Julho, 2012	Agosto, 2012	Setembro, 2012	Outubro, 2012	Novembro, 2012	Dezembro, 2012	Janeiro, 2013	Feveiro, 2013	Março, 2013	Abril, 2013	Mai, 2013	Junho, 2013	Julho, 2013	Agosto, 2013	Setembro, 2013	Outubro, 2013	Novembro, 2013	Dezembro, 2013
Horas (UT)																								
11:00																								
12:00																								
13:00																								
14:00																								
15:00																								
16:00																								
17:00																								
18:00																								
19:00																								

Tabela 3.1 – Variação dos horários do “tipping” (da autora)

Tais variações de horário ocorriam para 45 GHz e 90 GHz. As cores se referem: verde para o primeiro horário de medição, laranja para o segundo horário de medição, azul, para o terceiro horário de medição e cinza para o quarto horário de medição. No caso das medidas em vermelho do primeiro horário, ou mesclado entre vermelho e verde, se referem para os dias dos meses (pode-se observar que são as mesmas épocas nos dois anos), não havia ajustes para o horário das 13:00 UT, porque o gráfico do ajuste era interrompido a 20° de elevação ou não se realizou a medida de forma a obter um valor de opacidade para esse horário.

Após a abertura dos arquivos, passamos a escolher aqueles os quais valores de tau tinham um ajuste de valor de χ^2 igual a 1 e que visualmente o ajuste (linha em vermelho) passasse no maior número de pontos possíveis. Mas, descobrimos ao observar os dados, que ajustes menores ou próximos de 1 eram muito raros. Dessa forma, a escolha do valor da opacidade para o estudo estatístico foi feita para cada arquivo de medida por dois critérios:

- Um visual, devido ao gráfico de resposta dado o ajuste.
- Através do χ^2 do ajuste.

Sendo que no primeiro (escolha visual) observamos se o ajuste dado através do gráfico de saída do programa passava pela maioria ou todos os pontos. Se a

resposta para o ajuste visualmente fosse muito fora de uma forma exponencial, tivesse um χ^2 muito grande (acima de 100), ou não retornasse valores para o tau, ou não realizasse o ajuste, tendo a linha do mesmo interrompida, tais arquivos eram descartados. Até seria possível fazer essas escolhas automaticamente através de ajustes no programa de saída, porém uma lista automática podia incluir situações de corte como as descritas anteriormente.

Exemplo de ajustes não aceitos:

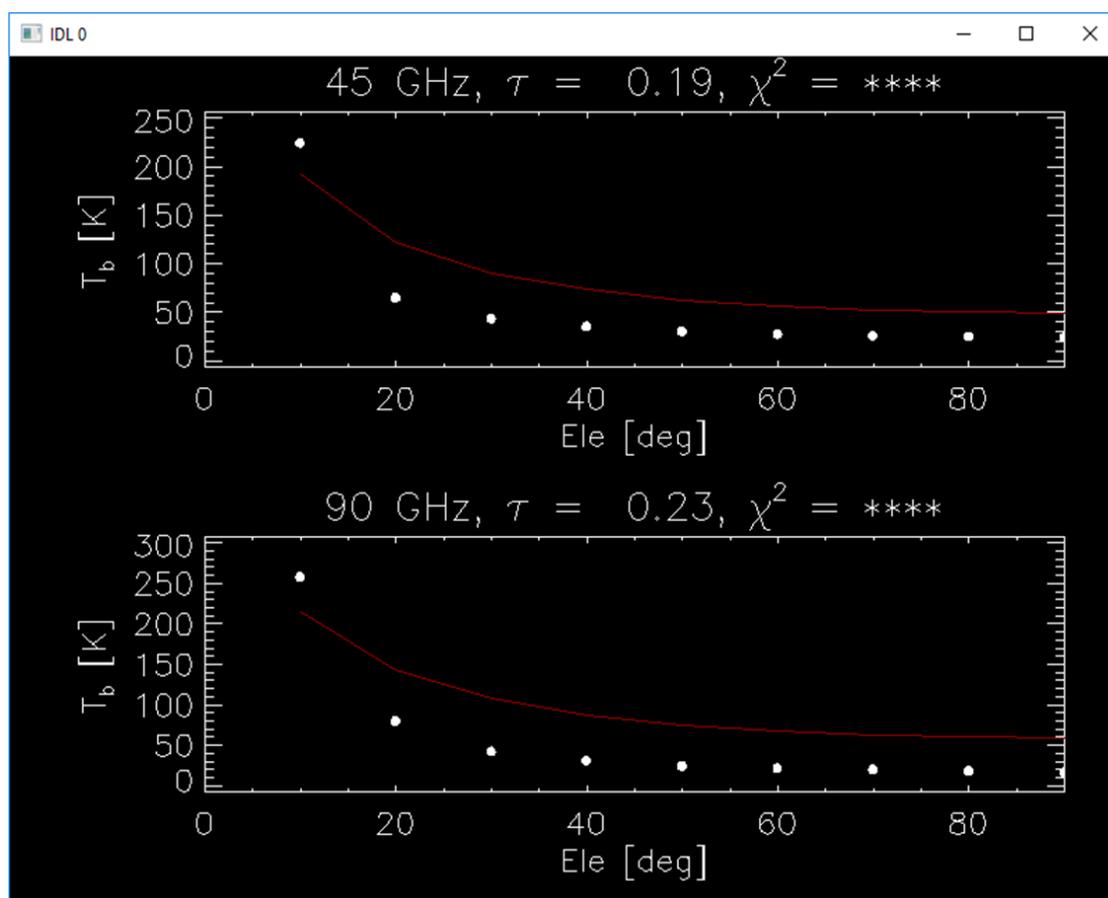


Figura 3.2 - Exemplo de ajuste não aceito para composição dos dados (saída da rotina – obtidos pela autora)

Depois, observamos que valores muito grandes de χ^2 não faziam sentido nas medições, pois poderiam gerar erros estatísticos desnecessários, e possivelmente representariam mau tempo ou cobertura por nuvens. Portanto, modificamos o critério de seleção para o recorte. Só passamos a selecionar os valores de tau que tivessem no máximo um valor de χ^2 até 5 para 45 GHz e até 10 para 90 GHz. Dessa forma na figura 3.3 há uma amostra do tipo de ajuste aceito.

Exemplo de ajustes aceitos:

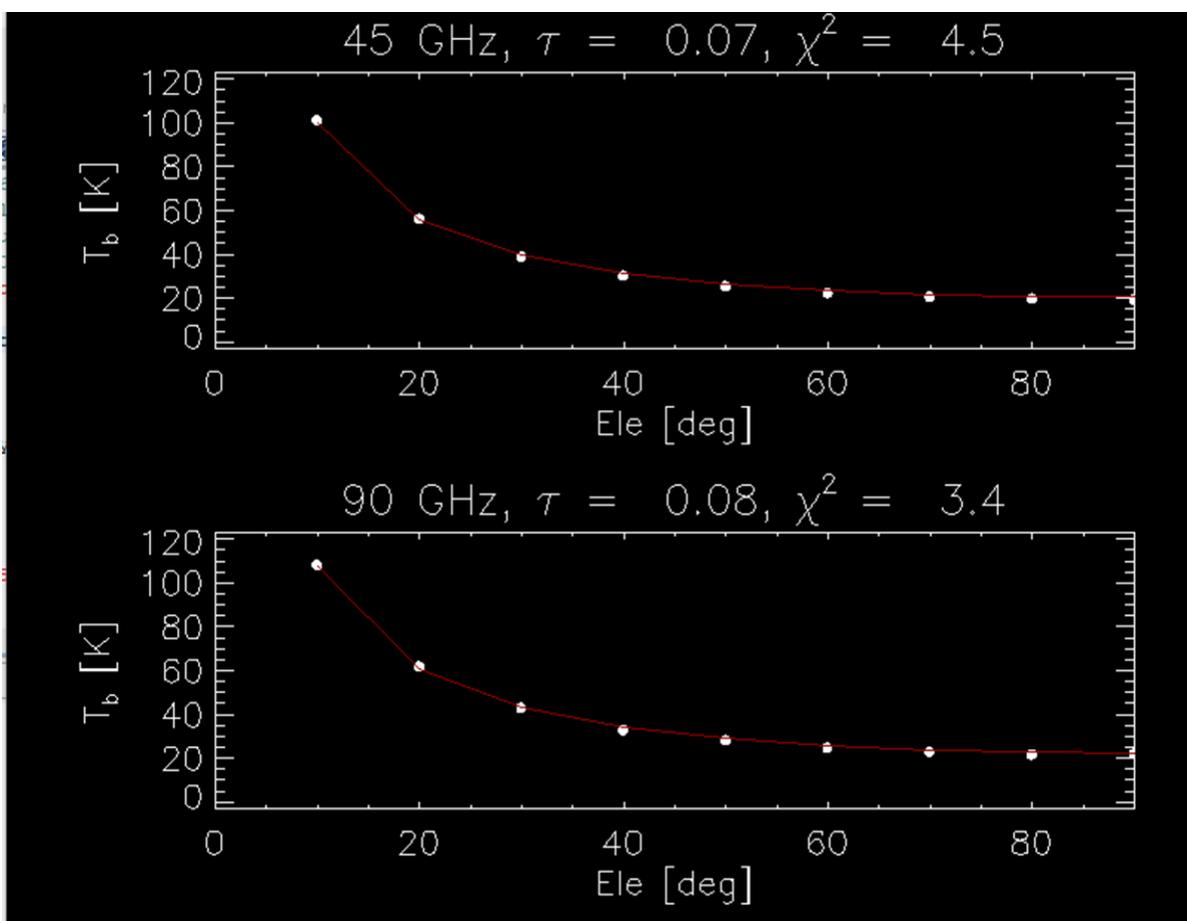


Figura 3.3 – exemplo de ajuste de curva de tipping aceito, com valores de qui-quadrado dentro do corte.
(saída da rotina – obtidos pela autora)

Os valores de corte são diferentes, porque se observou que os dados para 90 GHz são mais ruidosos do que os de 45 GHz, o que implicava em ajustes muito ruins nas curvas, ou medidas de profundidade óptica fora do esperado (Tendolini, 2014). Devido as quatro medições diárias, era esperada uma população de 1460 valores para cada um dos anos. O que de fato não ocorreu, pois devido a uma série de circunstâncias, como será mais detalhado na análise dos dados, o “tipping” não foi realizado (provavelmente devido ao não funcionamento do telescópio por diversos motivos), a existência de problemas na própria medição o que levou a exclusão dos dados ou por fim, o próprio recorte condicionado aos valores escolhidos de χ^2 .

Tais procedimentos geraram planilhas mensais de valores para 45 GHz e 90 GHz. As quais, receberam um tratamento estatístico e produziram uma análise descritiva mensal como é possível observar no Anexo A – Planilhas Mensais. Produzindo assim os valores das medianas, das médias e desvio padrão para a profundidade óptica. Depois esses mesmos dados foram agrupados sazonalmente e se construíram tabelas parecidas, sendo agrupadas em relação ao ano e depois ao biênio 2012/2013.

Dessa forma, todos os gráficos e histogramas obtidos para análise dos dados desse trabalho, foram retirados dessas planilhas que estão no Anexo A, como, por exemplo, os que estão mostrados a seguir na fig. 3.4.

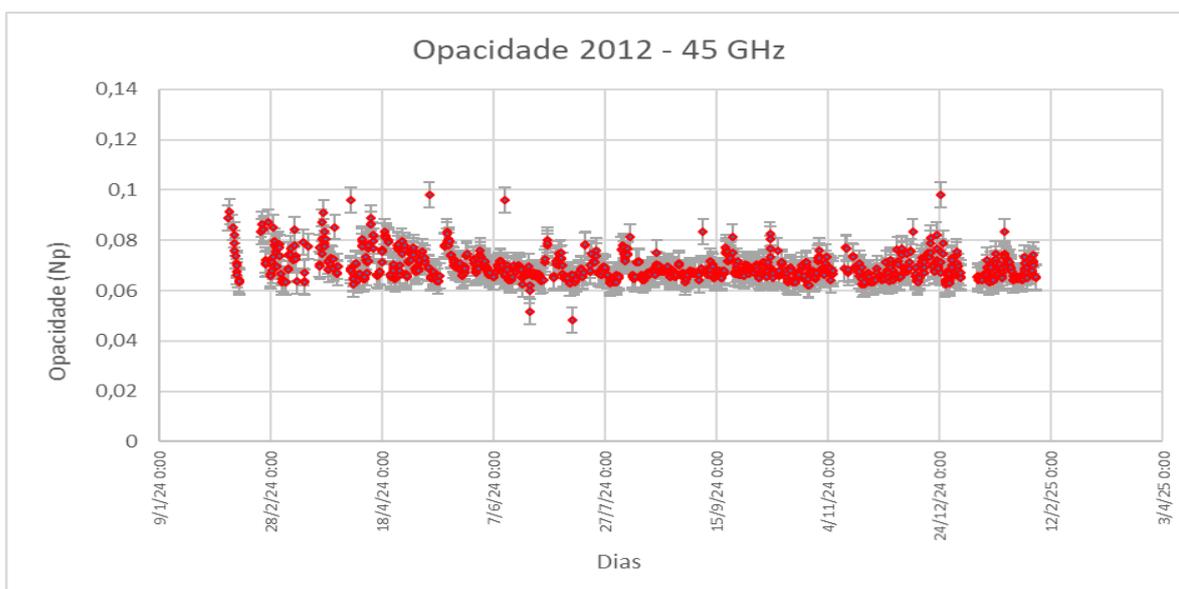


Figura 3.4 – Variação anual do valor da profundidade óptica de 45 GHz para o ano de 2012 (da autora)

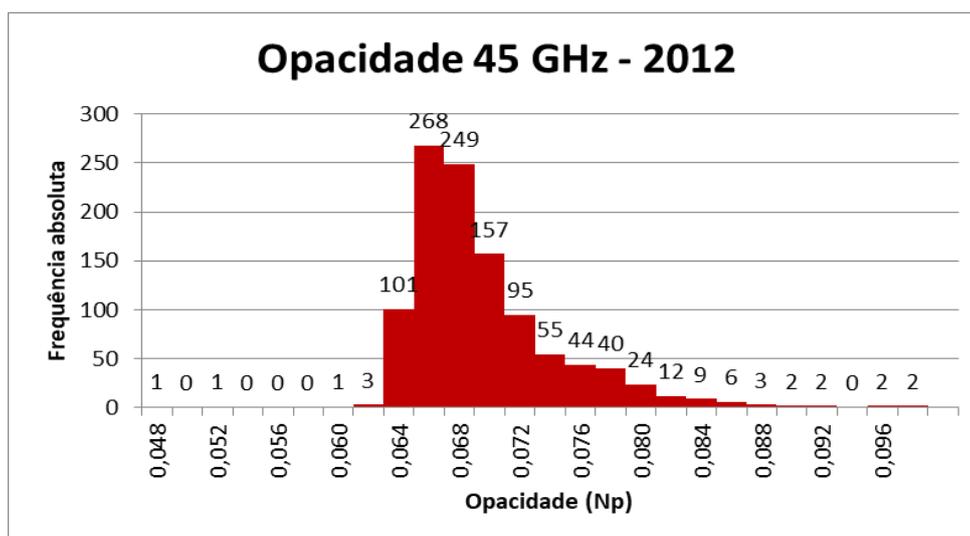


Figura 3.5 – Histograma com a distribuição dos valores de tau para 45 GHz (da autora)

.Ainda, como fizemos uma análise da relação entre o PWV e a opacidade para 45 e 90 GHz, é necessário relatar que os valores de PWV foram obtidos através de dados retirados da estação da rede AERONET que há no CASLEO e que entre todos os dados disponíveis foram relacionados com as datas e os horários das medidas de opacidade obtidas pelo POEMAS. Essa relação se deu comparando a data e o horário da medida de 45 e 90 GHz do POEMAS e comparando com a medida de PWV que fosse do mesmo dia e com uma variação de até 15 minutos para mais ou para menos com o horário dado pela medida do radiômetro da estação.

No estudo estatístico, se as medidas obtidas têm grande amplitude de valores, ou se nesse conjunto apareceram medidas com valores ou muito pequenos ou muito grandes nos extremos do conjunto (“outliers”), tais valores podem influenciar no valor da média para valores centrais que não descrevem o valor mais esperado para o conjunto. Para se evitar tal possibilidade, a mediana é a medida de tendência central mais utilizada nesse caso em detrimento da média.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE DADOS

4.1 Análise anual

Ao realizar a análise estatística, tínhamos como população inicial 1460 medidas por ano, porém, devido a aplicação do recorte para a escolha de de medidas com valores de χ^2 conforme já descrito (para 45 GHz medidas com qui-quadrado menores ou iguais a 5 e para 90 GHz, menores ou iguais a 10), houve uma redução desse valor inicial, e também houve dias onde não para os quais não se realizou o tipping. Na tabela 4.1., são dadas essas quantidades de medições, bem como seu percentual frente ao total esperado.

Variação da população de medidas

Quantidade esperada	Ano	Frequência	Quantidade utilizada	Percentual aceito	Percentual rejeitado	Percentual de corte (corte usando o χ^2 entre os rejeitados)
1460 Medidas	2012	45 GHz	1077	73,77%	26,23%	14,72%
		90 GHz	708	48,49%	51,51%	40,00%
	2013	45 GHz	812	55,62%	44,38%	31,78%
		90 GHz	626	42,88%	57,12%	38,52%
2920 Medidas	2012/2013	45 GHz	1889	64,69%	35,31%	23,26%
		90 GHz	1334	45,68%	54,52%	42,47%

Tabela 4.1 – Quantidades de medições utilizadas no estudo.

Da quantidade de medidas rejeitadas, foi apurado que 11,51% para 2012 e 12,60% para 2013, se devem ao fato da não realização do tipping em algumas datas (para ambas as frequências, pois se não há varredura, ambas as frequências não são medidas). Sendo que, para o biênio há, uma perda de dados que é de 12,05% para essa ocorrência. Tais valores implicavam dizer que o corte realizado com o objetivo de escolher os melhores ajustes era menor que o chamado percentual rejeitado. Dessa forma, o percentual de corte é demonstrado na sétima coluna da tabela 4.1. Analisando os valores, se observou que, para o ano de 2013 o percentual de corte é maior do que para o ano de 2012 para a frequência de 45 GHz, possuem valores e bem próximos para 90 GHz.

Com os valores de opacidade definidos, foram construídos gráficos dos valores da opacidade em função dos dias para ambas as frequências. Analisando a frequência de 45 GHz vemos os resultados estão nos gráficos 4.1.1, 4.1.2, e 4.1.3. Em todos os gráficos foram usadas datas transformadas em calendário Juliano e as barras de erro são estimadas através do desvio padrão encontrados na análise estatística (que estão demonstrados para as duas frequências na tabela 4.2).

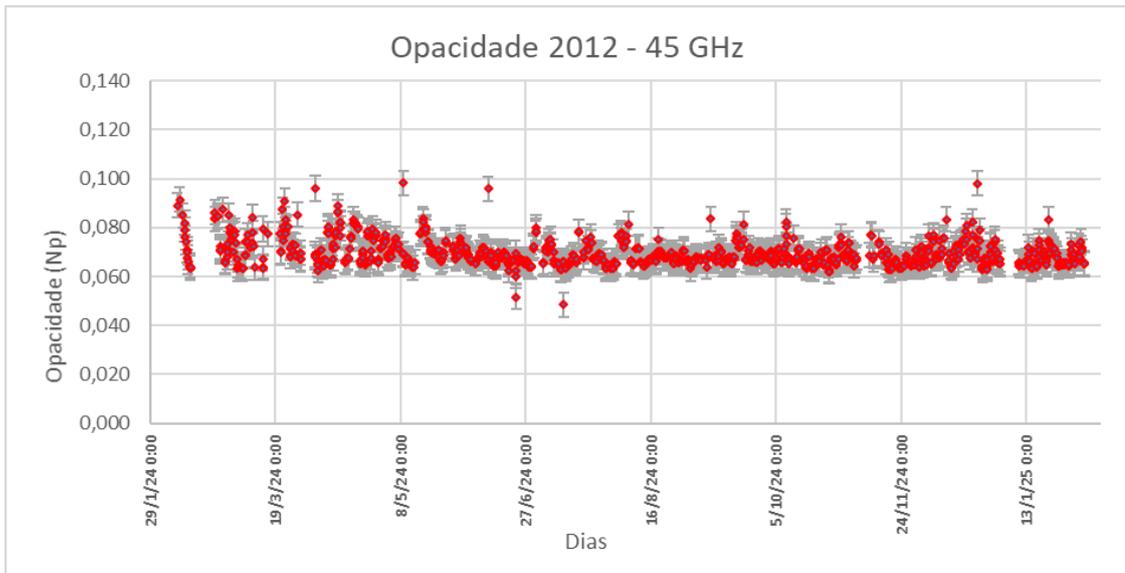


Figura 4.1.1 – Variação anual da opacidade para 45 GHz – Ano 2012 (da autora)

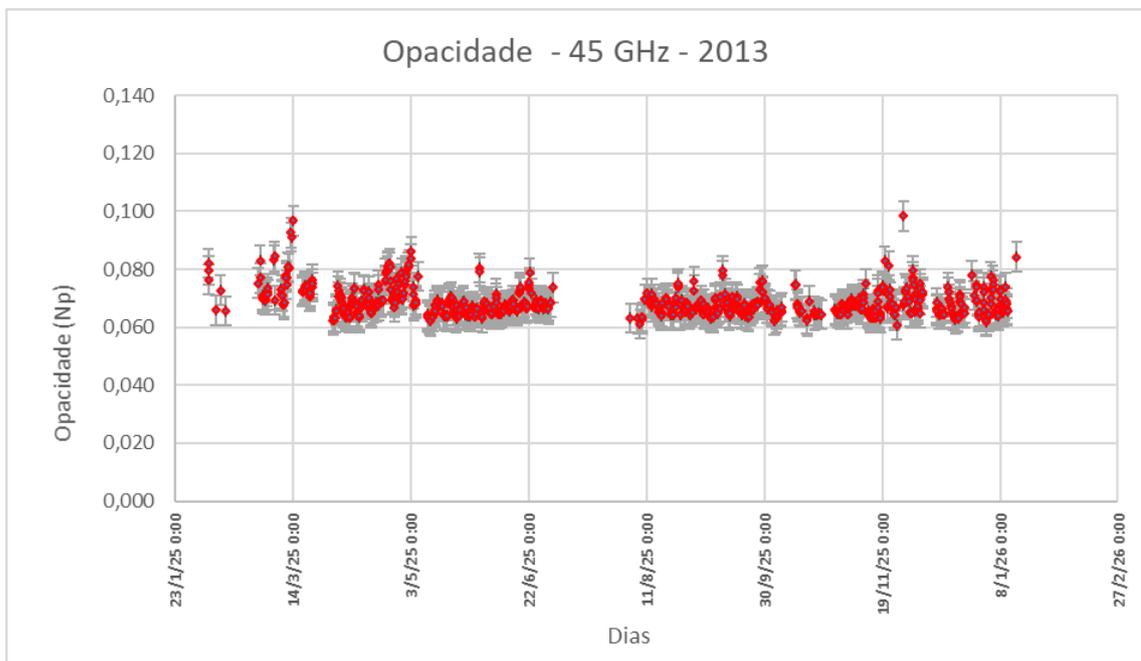


Figura 4.1.2 – Variação anual da opacidade para 45 GHz – Ano 2013 (da autora)

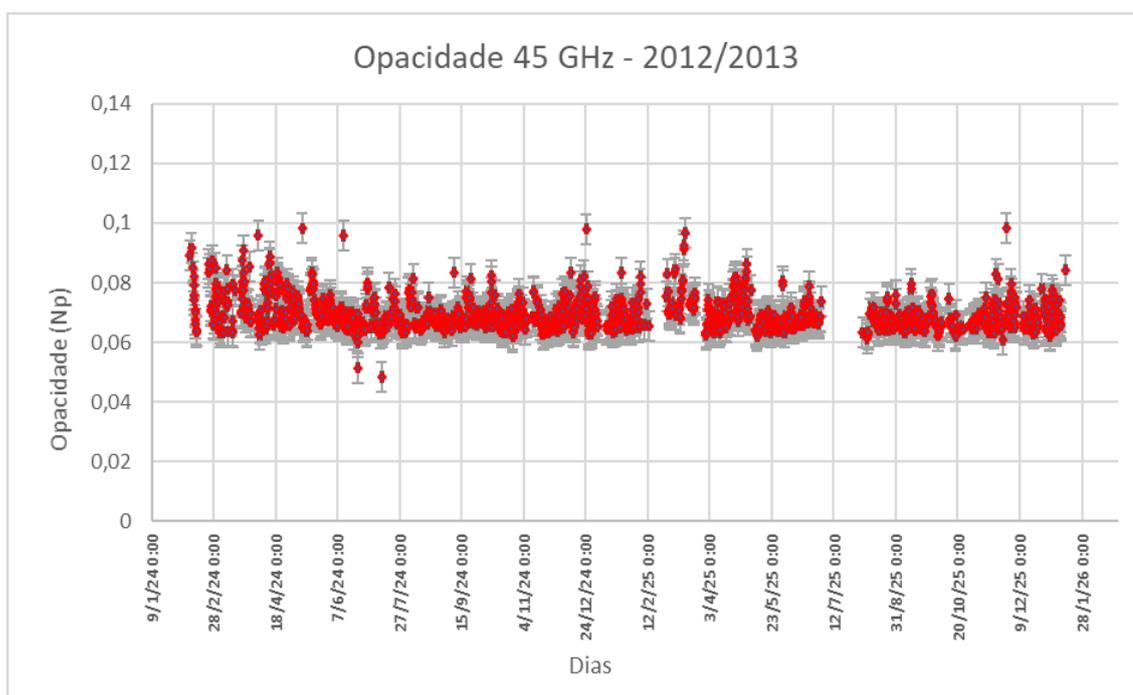


Figura 4.1.3 – Variação anual da opacidade para 45 GHz – Anos 2012/2013 – da própria autora

Para a frequência de 45 GHz pôde-se observar que para a estação úmida (que ia do final de dezembro até março) os valores da opacidade variam entre valores de 0,059 Np até 0,090 Np. Enquanto para a estação seca, que ia do final de março até meados de novembro, os valores variam bem menos, ficando entre 0,059 Np e 0,080 Np, com algumas medidas acima dos 0,080 Np. Com exceção de uma lacuna no mês de junho de 2013, os gráficos 4.1.1 e 4.1.2 são muito parecidos em relação a distribuição de regiões com valores com maior amplitude. Sendo os desvios padrão com valores de 0,005 Np para os dois anos (2012 e 2013) e para o biênio 2012/2013.

Tal comportamento tem contraste com a frequência de 90 GHz, que além de apresentar mais lacunas durante os dois anos, também tem uma maior variação de seus valores, sendo que para 2012 os valores variam desde 0,030 Np até 0,120 Np, e também apresentando as mesmas características de ter maior amplitude na estação úmida que na estação seca, conforme podemos observar nas figuras 4.1.4, 4.1.5, 4.1.6. Sendo que na estação seca sua variação é de 0,030 Np até 0,060 Np. Quando se observa o ano de 2013, há o mesmo comportamento entre as duas estações (úmida e seca) porém, com valores maiores, indo entre 0,025 Np até 0,170 Np na estação úmida e 0,025 Np à 0,065 Np na estação seca. Como poderá ser

visto mais a frente, tal diferença e alargamento nos valores da opacidade podem estar ligados à maior presença de vapor de água no ano de 2013 do que em 2012.

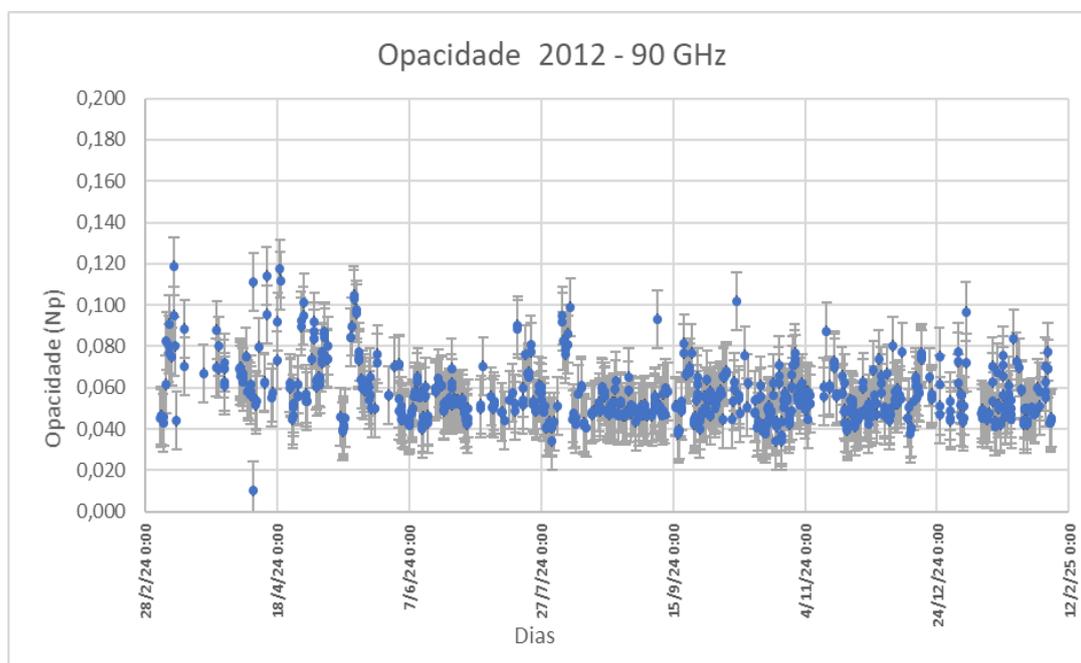


Figura 4.1.4 -- Variação anual da opacidade para 90 GHz – Ano 2012 – da própria autora

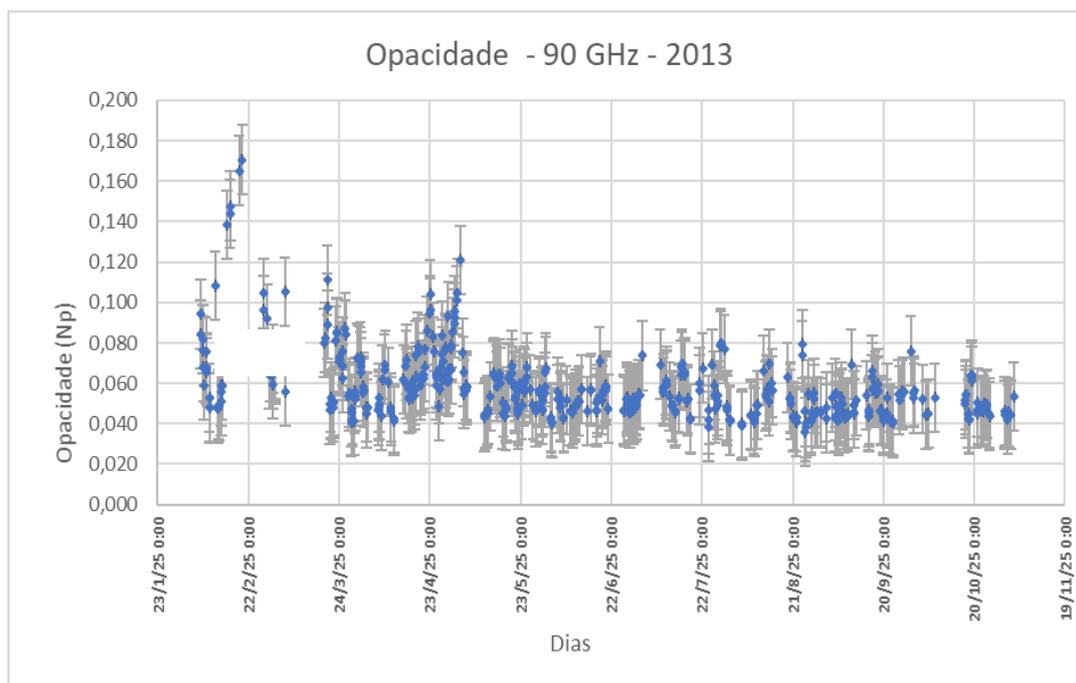


Figura 4.1.5 - Variação anual da opacidade 45 GHz/2012 (da autora).

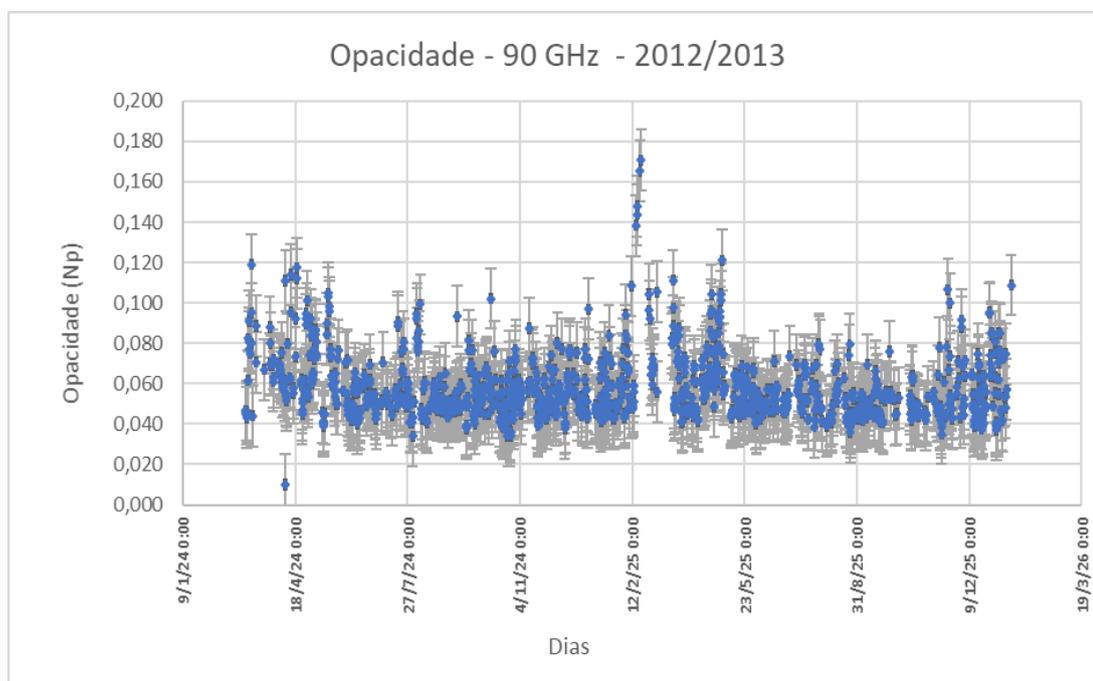


Figura 4.1.6 - Variação anual da opacidade e estação do ano para 90 GHz (da autora)

Utilizando então, o software estatístico obtemos a mediana, a média e desvio padrão mês a mês e anual. Os valores anuais foram descritos na tabela 4.2.

Ano	Frequência (GHz)	Mediana (Np)	Média (Np)	Desvio Padrão (Np)
2012	45	0,068	0,069	0,005
	90	0,054	0,057	0,014
2013	45	0,067	0,068	0,005
	90	0,053	0,057	0,017
2012/2013	45	0,068	0,069	0,005
	90	0,053	0,057	0,015

Tabela 4.2 - Valores da opacidade de 45 GHz e 90 GHz para 2012, 2013 e 2012/2013 (da autora)

Assim, para caracterizar o comportamento da opacidade durante o ano, foram feitos os histogramas anuais para cada frequência para os anos de 2012, 2013 e 2012/2013.

Na figura 4.1.7, temos tais distribuições para 45 GHz:

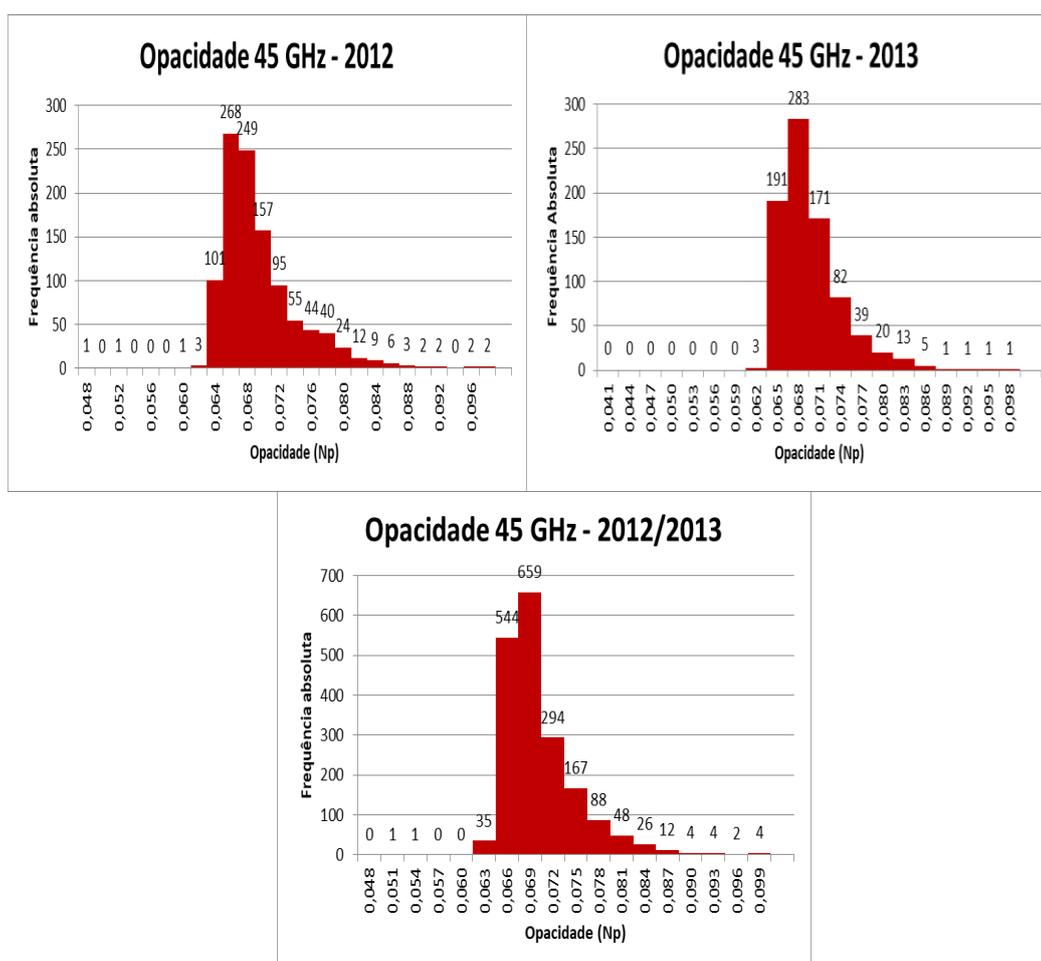


Figura 4.1.7 – Histogramas 45 GHz para 2012, 2013 e 2012/2013 (da autora)

Como a opacidade é uma grandeza física, era de se esperar uma distribuição que se assemelhasse com uma distribuição normal, de forma a apresentar um pico, com maior contagens e ramos simétricos, sendo perceptível que não ocorre em nenhum dos histogramas apresentados na figura 4.1.7. Neles, além da forma bastante íngreme nos ramos à esquerda, temos para o ramo da direita (com exceção a 2013), um decaimento que é íngreme, mas que apresenta uma forma que remete um ramo assimétrico à direita. Tais formas de distribuição parecem ser comuns nos estudos sobre a opacidade (Otárola, et al.,2010) em outras regiões e podem indicar as próprias condições climáticas associadas ao conteúdo de vapor de água na atmosfera local.

Quando comparamos os valores encontrados com os picos de cada ano, vemos que o valor encontrado para o pico de 2012 é de 0,066 Np e está dentro do intervalo do desvio padrão para a média do mesmo ano (tabela 4.2.2), sendo

também próximo à mediana. Um pouco diferente do que ocorre com a distribuição para 2012/2013 e 2013, onde os valores dos picos são de 0,068 Np para 2013 e 0,069 para 2012/2013 que coincidem com a média e têm valores muito próximos com as medianas de seus respectivos anos. É provável que esse deslocamento esteja ligado com a presença de um maior conteúdo de vapor de água, pois a média anual de PWV para 2013 é maior que 2012 (dados obtidos a partir da rede AERONET).

Procedendo da mesma forma, fez-se a análise para a frequência de 90 GHz, e os histogramas obtidos estão dispostos na figura 4.1.8.

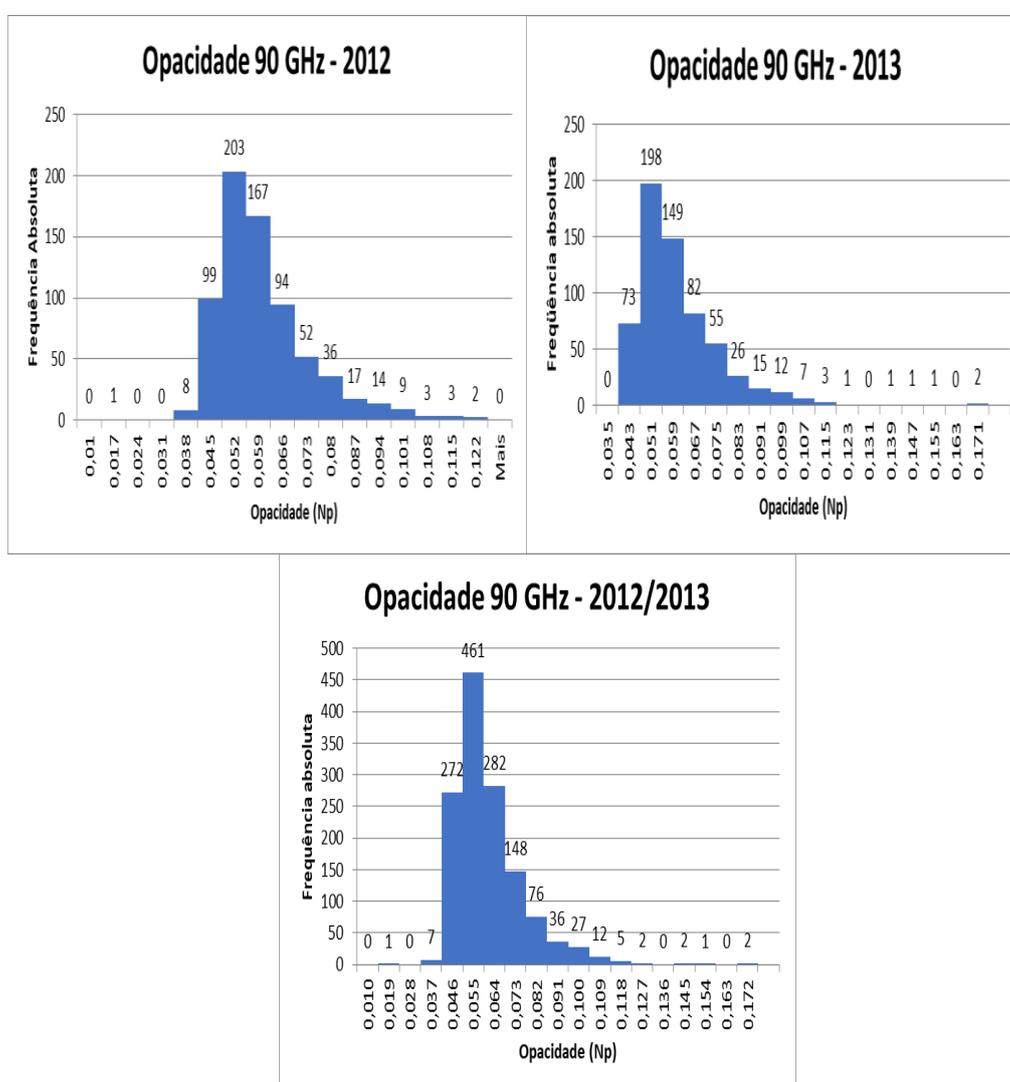


Figura 4.1.8 – Histogramas 90 GHz para 2012, 2013 e 2012/2013 (da autora)

Ao se analisar a frequência de 90 GHz também observamos essa característica da distribuição das opacidades se parecerem assimétricas a direita, porém para 2012 e 2013 se tem o padrão parecido de subida forte a esquerda e uma descida menos abrupta. Mas para o biênio de 2012/2013 esse padrão de comportamento muda um pouco, onde se percebe duas classes quase com mesma quantidade de medidas, uma delas com valor de 0,046 NP e outra com valor de 0,064 Np, o que pode sugerir que, para anos com maior valor de vapor de água, poderemos ter valores distintos de opacidade; um para estação seca, o de valor menor, e outro maior para a estação úmida.

Com relação ao estudo estatístico, mostrado na tabela 4.2, observamos que os valores para o ano de 2012, 2013 e para o conjunto de dados dos dois anos, os valores da mediana são muito parecidos 0,054 Np, 0,053 Np e 0,053. E o mesmo acontecendo com a média, onde os três valores são idênticos e valem 0,057 Np.

Para observarmos como variou a opacidade mês a mês foram feitos os gráficos das figuras 4.1.9 e 4.1.10, onde se observou que havia uma variação mensal da opacidade (tanto para mediana quanto para a média), e novamente se apresentou comportamento no qual os valores da opacidade são maiores para a estação úmida e apresentam uma variação maior do que para a estação seca. Também foi observado que os valores para a opacidade de 45 GHz tem uma amplitude menor que a observada para 90 GHz.

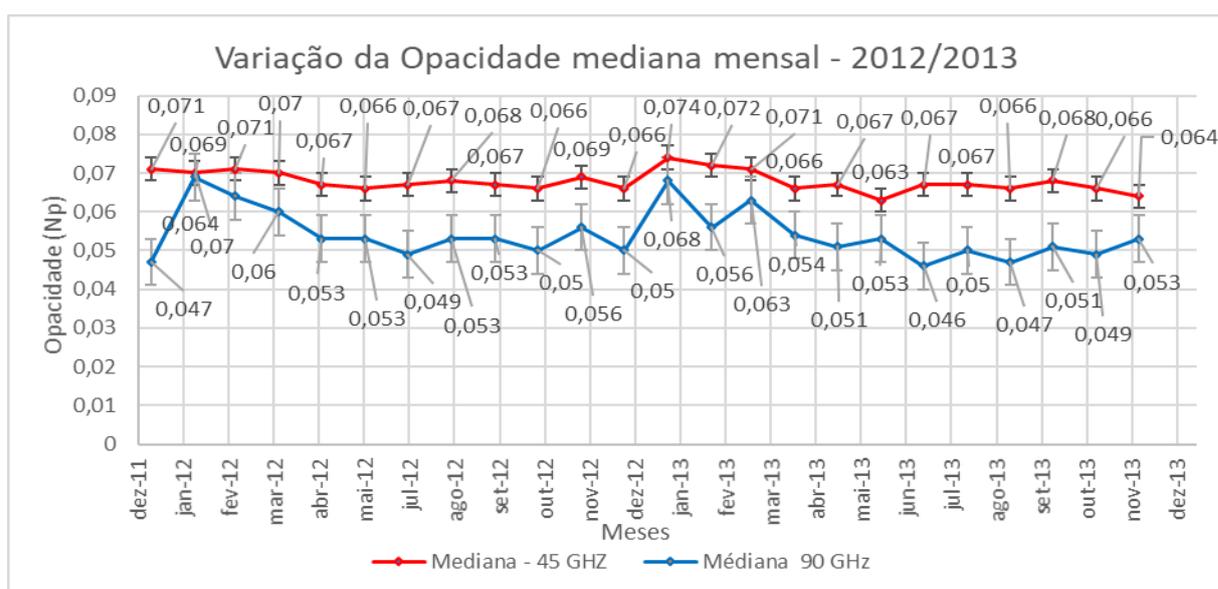


Figura 4.1.9 - Variação da mediana mensal da opacidade para 2012/2013 (da autora)

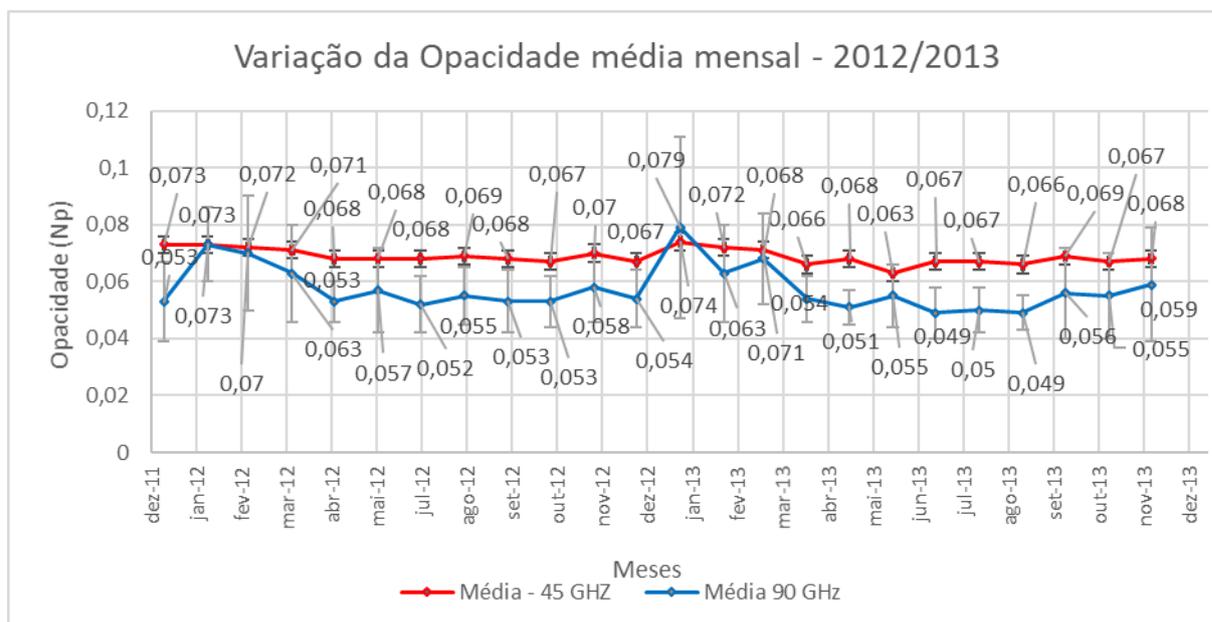


Figura 4.1.10 - Variação da média mensal da opacidade para 2012/2013 (da autora)

Sendo interessante observar também que tanto para média, quanto mediana os valores da frequência de 90 GHz sempre eram menores que os de 45 GHz, com exceção de dois meses (janeiro/2012 e janeiro/2013 – meses com maiores pluviosidades), onde esses valores de opacidade se igualaram ou foram ultrapassados, porém ainda dentro da barra de erro. Também foram observados como a mediana e a média se comportavam para a mesma frequência, e conforme é demonstrado pelos gráficos das figuras 4.1.11 e 4.1.12.

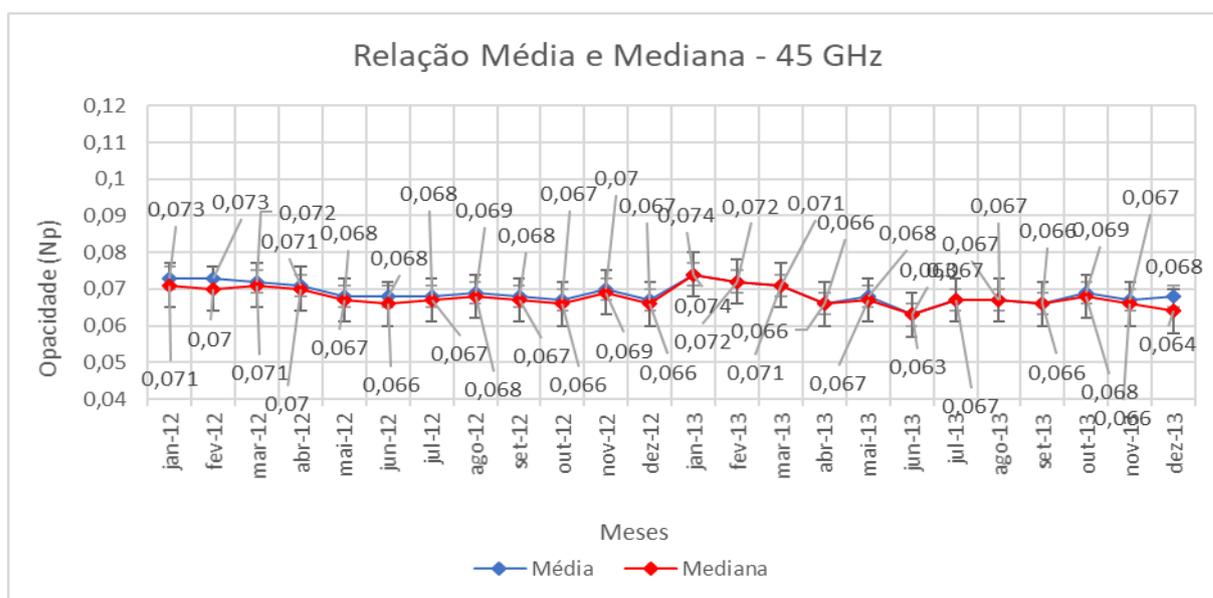


Figura 4.1.11 – Relação entre a mediana e a média mensal da opacidade para 2012/2013 para 45 GHz (da autora)

Para a frequência de 45 GHz, os valores entre a mediana e a média não variavam muito, sendo que para vários meses (principalmente no período seco) eram coincidentes, diferente do que acontecia com 90 GHz, onde dificilmente esses valores coincidiam e principalmente para média esses valores variavam para os meses da estação úmida, e a média sempre apresentava valores menores que a mediana.

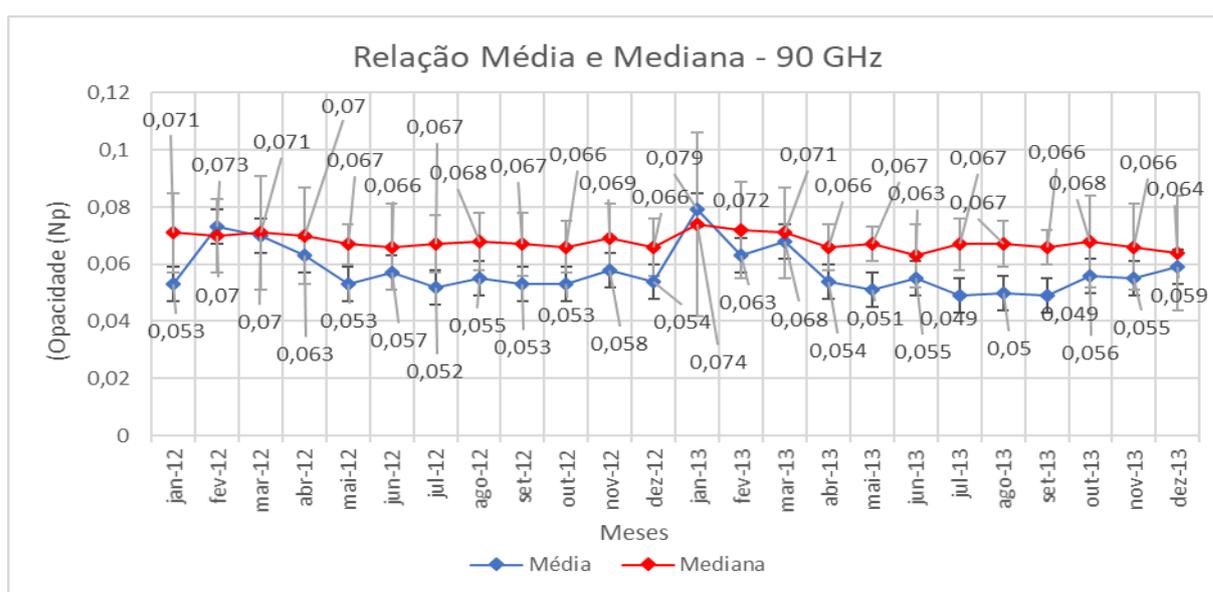


Figura 4.1.12 – Relação entre a mediana e a média mensal da opacidade para 2012/2013 para 90 GHz (da autora)

Provavelmente os valores médios mais baixos que foram observados para a frequência de 90 GHz se devessem ao fato que para esse valor de frequência, parecer mais sensível a variação e o aumento do vapor de água. E também, para valores maiores que a média, a presença dos outliers, devido a presença de maior umidade desviava o valor médio do centro da distribuição, por isso, nesses casos, a mediana é mais indicada como medida de tendência central.

Portanto, novamente pode-se notar a importância do conhecimento do PWV de El Leoncito para corroborar essa relação e determinar a correlação entre o comportamento da profundidade óptica e o vapor de água presente.

O CASLEO fica localizado na província argentina de San Juan, mais precisamente no distrito de Calingasta, dentro de um parque nacional chamado de El Leoncito. Possui clima semidesértico e frio, com baixa pluviosidade (no máximo 200 mm anuais) e grande luminosidade, porém apresenta maior quantidade de chuva nos períodos de verão (o que reforça as modificações na opacidade dentro desses períodos) sendo que os valores de PWV durante o ano de 2012 podem ser observados pelo gráfico a seguir retirado da página da rede AERONET²

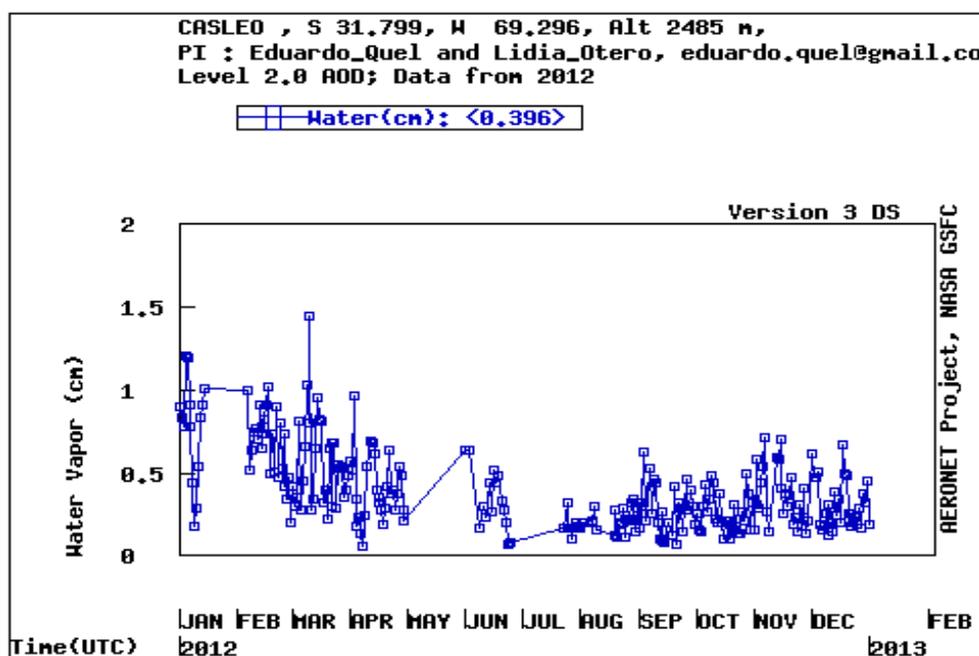


Figura 4.1.13 – Gráfico da variação do vapor de água durante ano de 2012 – Autoria https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3.

² Endereço do site: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3

Onde, na figura 4.1.13, podemos observar que realmente durante de fevereiro, março (estação úmida) há valores de PWV maiores que nas demais estações, logo realmente era de se esperar maiores valores de profundidade óptica como foi observado a tabela 4.2 para estação úmida e os gráficos das figuras 4.1.9 e 4.1.10. Padrão esse, que se repetiu em 2013, e que pode ser observado pelo gráfico 4.1.14.

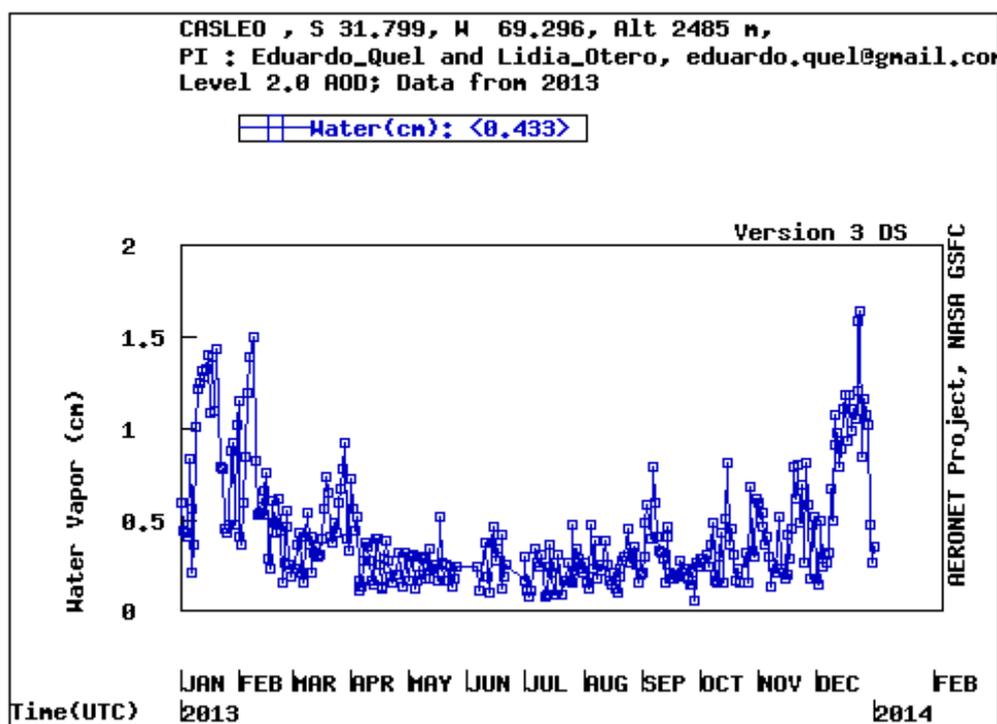


Figura 4.1.14 - Gráfico da variação do vapor de água durante ano de 2012 – Autoria https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3?site=CASLEO&nachal=0&year=2013&aero_water=1&level=3&if_day=0&if_err=0&place_code=10&year_or_month=1

Assim, há uma relação com a sazonalidade através do ano, logo, ao dar início a segunda parte da análise, vamos observar a variação da opacidade durante o ano e as possíveis correlações para a estação úmida (verão) e as outras que são mais secas.

4.2 Análise Sazonal

A possibilidade de se ter no CASLEO uma opacidade que varia durante a estação seca e a úmida, foi inferida após observamos as distribuições dos dois anos e do conjunto 2012/2013 e da discussão do estudo estatístico feito para variação mensal dos mesmos períodos.

Assim, são apresentados na tabela 4.3 os valores de mediana, média e desvio padrão para o verão (valores de tau obtidos no período de 01/01/2012 à 20/03/2012, 21/12/2012 à 20/03/2013 e 01/01/2013).

Valores da opacidade para o verão

Ano	Frequência (GHz)	Mediana (Np)	Média (Np)	Desvio padrão (Np)
2012	45	0,070	0,073	0,007
	90	0,067	0,068	0,019
Final 2012 / Início de 2013	45	0,070	0,072	0,007
	90	0,065	0,068	0,022
2013	45	0,070	0,071	0,006
	90	0,068	0,068	0,023
2012/2013	45	0,069	0,070	0,006
	90	0,061	0,065	0,022

Tabela 4.3 - Valores da opacidade do verão para 2012, 2013 e 2013/2013 (da autora)

Foi observado que para a frequência de 45 GHz, os valores da mediana praticamente não mudam durante o período estudado (0,070 Np) durante os dois anos e os valores para a média e dos valores de desvio padrão são praticamente os mesmos. Continuando a análise para a frequência de 90 GHz, observamos que as médias ficam praticamente com o mesmo valor, enquanto a mediana varia muito pouco (entre 0,061 Np e 0,068 Np). Porém de desvio padrão para 90 GHz possuíam valores quase três vezes maiores em relação aos de 45 GHz nos dois anos e no biênio, fato que poderia estar ligado a sensibilidade maior da frequência de 90 GHz ao aumento do nível de umidade. Também foi visível que os valores das diferentes frequências são bem próximos entre si.

Dando continuidade, estudamos o outono valores obtidos entre 21/03/2012 à 21/06/2012 e 21/03/2013 à 21/06/2013, e dispostos na tabela 4.4

Valores para a opacidade durante o outono

Ano	Frequência (GHz)	Mediana (Np)	Média (Np)	Desvio padrão (Np)
2012	45	0,068	0,069	0,005
	90	0,056	0,060	0,014
2013	45	0,067	0,068	0,004
	90	0,055	0,057	0,012
2012/2013	45	0,068	0,069	0,005
	90	0,055	0,058	0,013

Tabela 4.4 - Valores da opacidade do outono para 2012, 2013 e 2012/2013 (da autora)

Durante o outono dos períodos estudados, os valores da mediana entre si, bem como os da média, são muito próximos, e isso ocorre para ambas as frequências. Entretanto, diferente do verão, onde os valores da opacidade entre as frequências têm números bem próximos, aqui começamos a observar que com a diminuição da ação do vapor de água (devido ao comportamento mais seco da estação) faz com que os valores opacidades comecem a se distanciar, mesmo que ainda dentro da faixa do desvio padrão. Porém ao observarmos o desvio padrão para as medidas de 45 GHz seus valores continuam quase idênticos aos valores do verão, porém, os obtidos para 90 GHz diminuem sua variabilidade de 0,019 – 0,023 Np, para valores entre 0,009 – 0,012 Np. Esse comportamento pode ser devido a aproximação da estação seca, bem como, ao fato de se possuir mais valores de medida no outono do que no verão. Caso seja devido a aproximação da estação seca pode demonstrar que conforme o nível de vapor de água presente na atmosfera diminui, abaixa os valores de opacidade (o que é esperado), e diminui o desvio padrão, ou seja, a variabilidade em torno do valor mais provável de opacidade também diminui.

Continuando a descrição sazonal, seguem os dados referentes ao inverno (período vigente de 22/06/2012 à 22/09/2012 e 21/06/2013 à 22/09/2013), na tabela 4.5.

Valores da opacidade durante o inverno

Ano	Frequência (GHz)	Mediana (Np)	Média (Np)	Desvio padrão (Np)
2012	45	0,067	0,068	0,005
	90	0,050	0,053	0,012
2013	45	0,067	0,067	0,003
	90	0,048	0,050	0,009
2012/2013	45	0,067	0,068	0,003
	90	0,049	0,052	0,011

Tabela 4.5 - Valores da opacidade do inverno para 2012, 2013 e 2012/2013 (da autora)

Com comportamento parecido com o outono, porém já na estação seca, o vapor de água presente estava no nível mínimo para ambos os anos, implica em valores muito próximos ou idênticos entre a mediana e a média para 45 GHz com um desvio padrão atingindo os menores valores. O mesmo aconteceu com a frequência 90 GHz, que apesar de ter mostrado valores menores que o outono, possuíam pequenas discrepâncias entre si. Tal comportamento pode ser devido ao fato que no inverno que é o auge da estação seca, o valor de PWV é mínimo, baixando assim os valores da opacidade.

Por fim, são apresentados os dados da primavera que foram obtidos nos períodos de 22/9/2012 até 20/12/2012 e 21/09/2013 à 10/12/2013 e estão demonstrados na tabela 4.6.

Valores da opacidade durante a primavera

Ano	Frequência (GHz)	Mediana (Np)	Média (Np)	Desvio padrão (Np)
2012	45	0,067	0,064	0,010
	90	0,053	0,055	0,010
2013	45	0,067	0,068	0,004
	90	0,049	0,055	0,016
2012/2013	45	0,067	0,065	0,010
	90	0,053	0,055	0,010

Tabela 4.6 - Valores da opacidade da primavera para 2012, 2013 e 2012/2013 (da autora)

Durante a primavera, temos um aumento na variabilidade das medidas, ou seja, um aumento no desvio padrão, podendo indicar que, ao findar a estação seca e começar a estação úmida, os valores de opacidade aumentam um pouco para a frequência de 90 GHz, que pareceu ser mais afetado pela presença no aumento do vapor de água. Contudo, a frequência de 45 GHz parece não ser muito afetada, pois seus valores não se modificam muito de um ano para o outro e não mudam muito entre si, nem quando o observado é a mediana ou a média.

A seguir, nas figuras 4.2.1 e 4.2.2, as variações dos valores das medianas durante as diversas estações dos anos durante os períodos de 2012 e 2013.

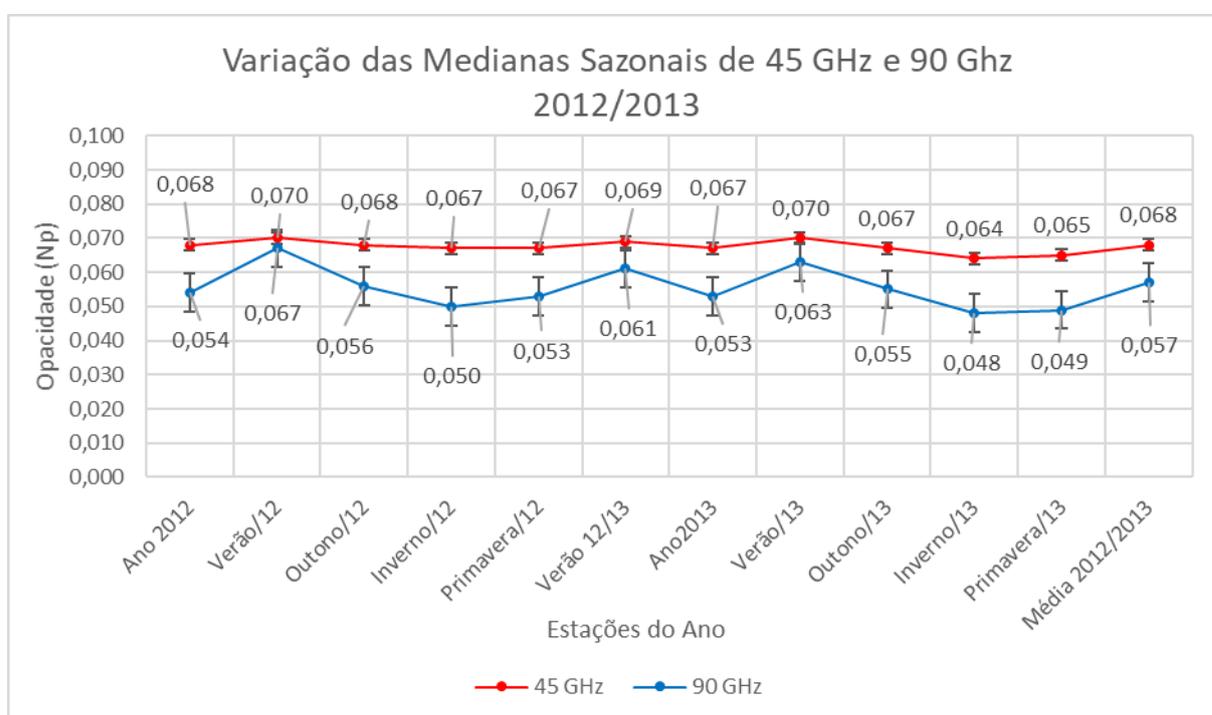


Figura 4.2.1 - Gráfico da variação da mediana da opacidade durante as estações entre 2012 e 2013

Mais uma vez, pôde-se observar que os valores das medianas para 45 GHz possuíam uma variação muito pequena de opacidade sazonalmente, aumentando levemente durante a estação úmida e diminuindo também levemente na estação seca em 2012. Comportamento que se repete no ano de 2013, porém, diferindo talvez por uma maior variação entre a estação seca e a úmida devido a presença de vapor de água em 2013 (que teve valor de PWV médio maior). Se observou um declive um pouco maior que 2012. Diferentemente da frequência de 90 GHz, que apresentou uma maior variação entre a estação seca e úmida. No verão, o valor da opacidade atingiu seu valor máximo, e durante o inverno, um valor mínimo para os

dois anos, sendo os mínimos semelhantes entre si, o mesmo ocorrendo com os máximos dentro do intervalo do desvio padrão calculado para esses valores.

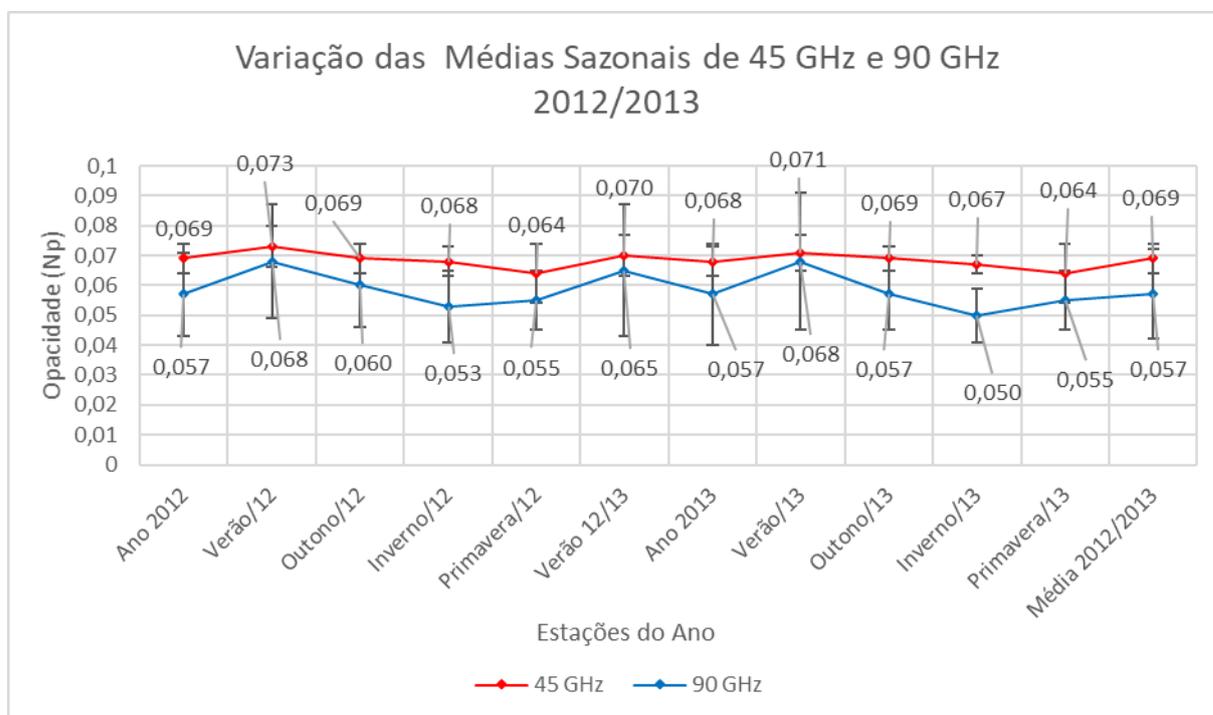


Figura 4.2.2. - Gráfico da variação da média da opacidade durante as estações entre 2012 e 2013

Ao se analisar o gráfico da figura 4.2.2, o comportamento da média com relação a opacidade é muito parecido com a discussão anterior, onde que para valores da frequência de 45 GHz pontualmente os valores são maiores, porém ainda se observou sua pouca variabilidade entre a estação seca e úmida. E um comportamento parecido com a mediana para 90 GHz, que também apresentou uma diferença de valores de opacidade entre a estação seca e a úmida sugerindo que essa frequência seja mais sensível a presença de vapor de água na atmosfera.

Continuando o estudo da opacidade em El Leoncito, podemos relacionar as opacidades de 45 e 90 GHz entre si através de uma relação linear. Tal relação é de bastante interesse, pois, caso algum dos polarímetros não esteja funcionando em um momento desejado, ou, não se tenha o valor determinado da opacidade em uma das frequências, através da relação é possível encontrar o valor para a frequência faltante. Dessa forma, foi feito um estudo da relação entre as duas frequências para o período de 2012, 2013 e do conjunto 2012/2013, sendo as mesmas relacionadas através dos gráficos das figuras 4.2.3, 4.2.4 e 4.2.5.

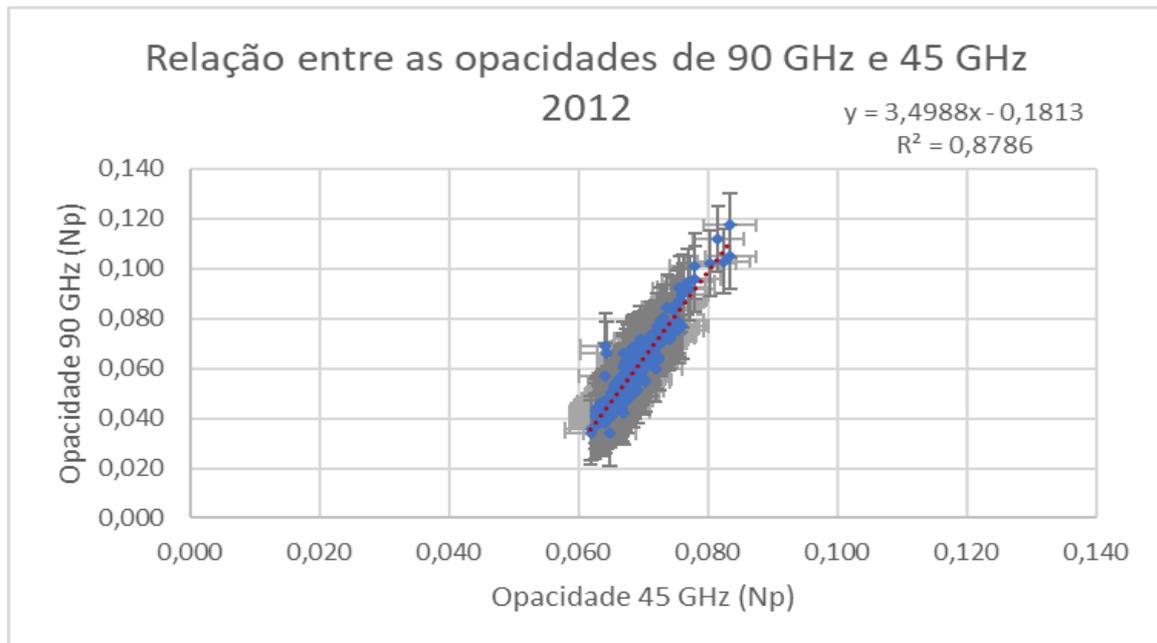


Figura 4.2.3 - Gráfico da relação entre as opacidades de 45 e 90 GHz – 2012 (autoria própria)

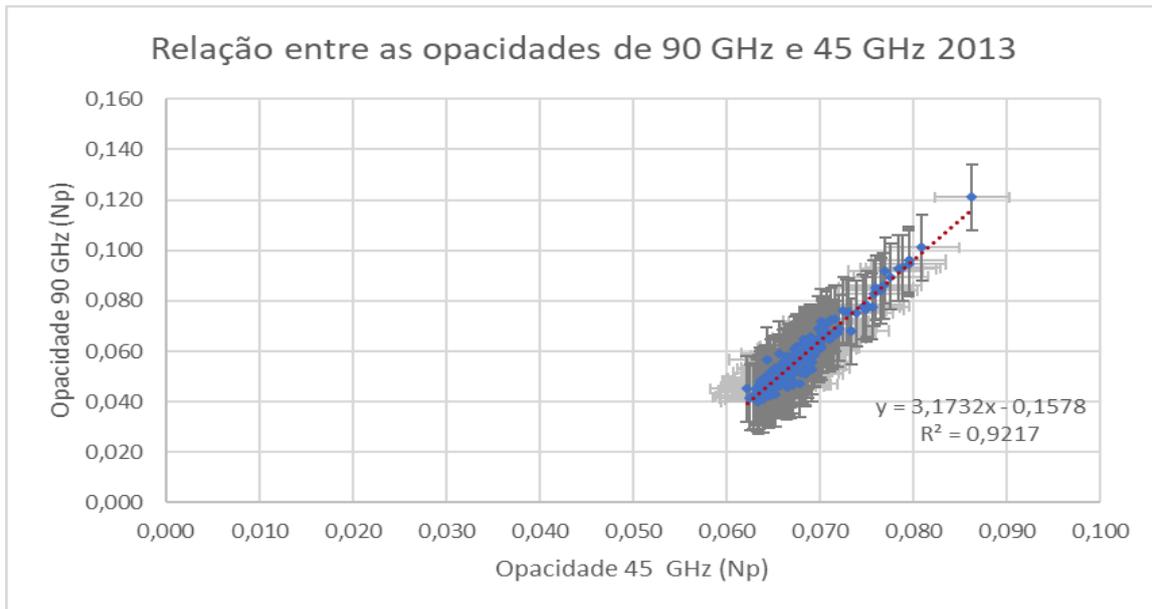


Figura 4.2.4 - Gráfico da relação entre as opacidades de 45 e 90 GHz – 2013 (autoria própria)

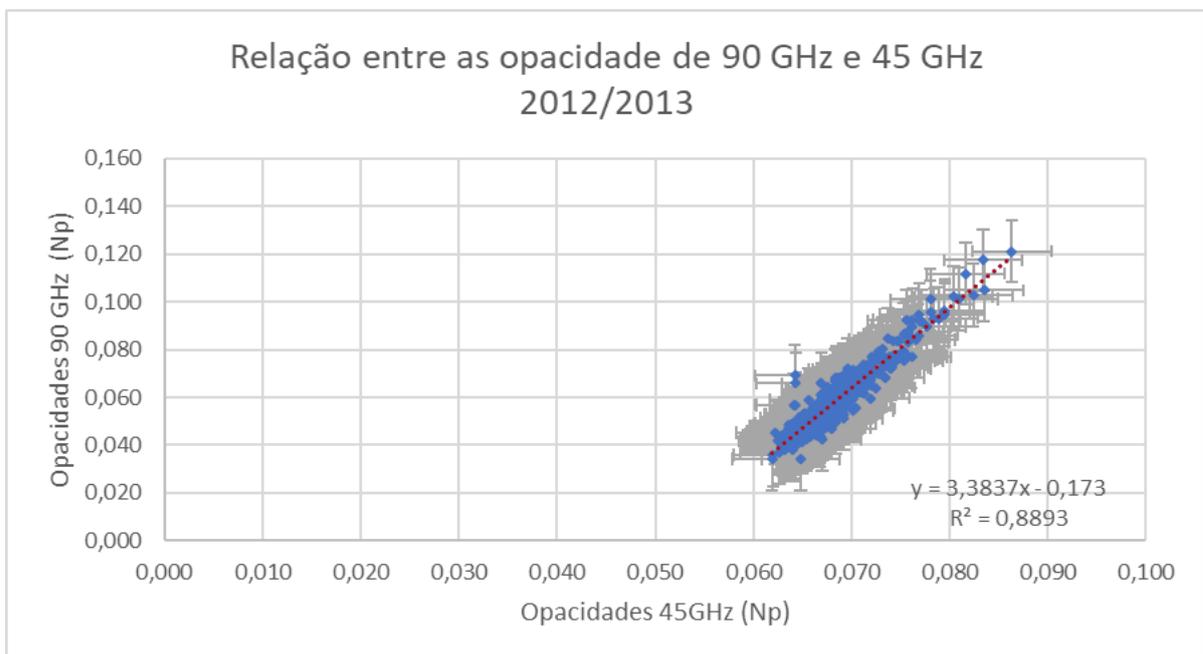


Figura 4.2.5 - Gráfico da relação entre as opacidades de 45 e 90 GHz – 2012/2013 (autoria própria)

Os resultados obtidos para a relação entre as opacidades de 2012 e 2013 são bem próximas entre si, como veremos a seguir, bem como o do ajuste para 2012/2013, levando em conta o coeficiente angular, mas com relação ao coeficiente linear do ajuste não são bons.

Assim, para o ano de 2012 obtivemos um ajuste entre as frequências dada pela expressão $\tau_{90} = (3,499 \pm 0,063) \cdot \tau_{45} - (0,181 \pm 4,5 \times 10^{-3})$, enquanto para 2013 a expressão é dada por $\tau_{90} = (3,173 \pm 0,070) \cdot \tau_{45} - (0,158 \pm 4,5 \times 10^{-3})$ e para os dois anos de medidas o ajuste é dado por $\tau_{90} = (3,384 \pm 0,041) \cdot \tau_{45} - (0,173 \pm 2,9 \times 10^{-3})$.

Na relação entre as opacidades a opacidade de 90 GHz foi colocada em função de 45 GHz, pois se apresentava mais instável e muitas vezes possuía menos valores disponíveis para sua obtenção.

Era esperado que os ajustes passassem pelo (0;0), o que não ocorreu, talvez porque no corte dos dados realizado, os valores menores de opacidade de ambas as frequências foram descartados, ou que exista um valor mínimo para a opacidade em ambas as frequências que seja dependente de condições meteorológicas locais e talvez dependente da quantidade vapor de água presente na atmosfera.

4.3 Relação entre a opacidade e o PWV

Como já descrito na introdução teórica, a opacidade está fortemente relacionada com o PWV (quantidade de vapor de água) sobre o local. Dessa forma, podemos relacionar através de uma relação linear a opacidade e o conteúdo de vapor de água (Gaut, N.E., Reifenstein, E. C., 1971). Assim, fizemos um estudo para o conjunto de dados de opacidade e os valores do PWV obtidos através da rede AERONET para os anos de 2012 e 2013 e depois compilados para o biênio 2012/2013. Porém, antes, observamos que o comportamento anual do PWV para as duas frequências é similar ao comportamento das opacidades no mesmo período (figuras 4.1.3 e 4.1.6) encontrando boa concordância entre os períodos úmidos com maiores valores e nos períodos secos com valores menores para ambas as frequências.

São demonstradas então as distribuições de PWV durante o biênio 2012/2013 nos gráficos dados pelas figuras 4.3.1 e 4.3.2. para valores simultâneos de opacidade em ambas as frequências.

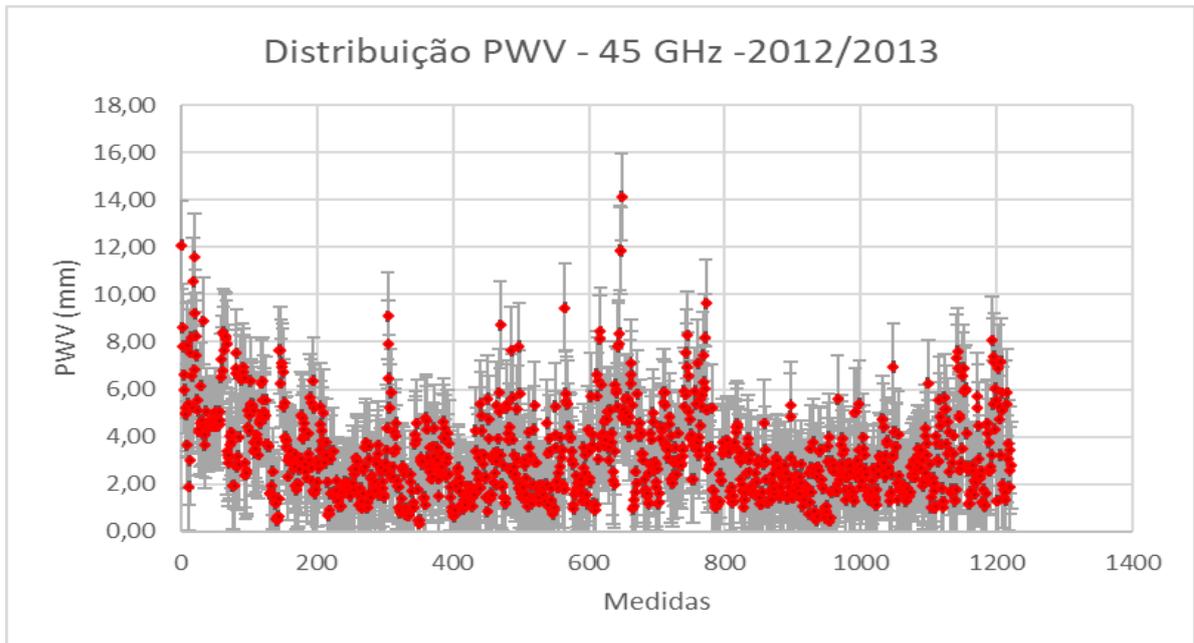


Figura 4.3.1 - Gráfico da distribuição anual do PWV para 45 GHz – 2012/2013 (autoria própria)

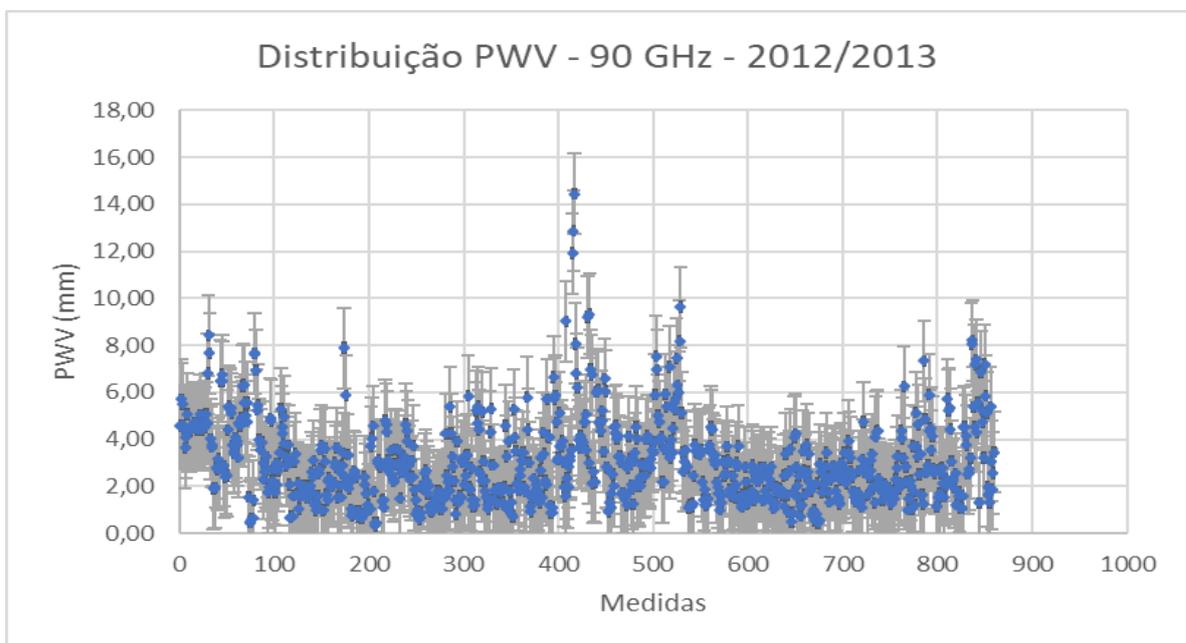


Figura 4.3.2 - Gráfico da distribuição anual do PWV para 90 GHz – 2012/2013 (autoria própria)

Também foi necessário observar se as distribuições de PWV tinham o comportamento parecido com as distribuições de opacidade, tendo aspecto similar a uma distribuição normal, porém com uma aparente assimetria à direita que é confirmado pelo seu valor de assimetria calculada estatisticamente (1,36 para 45

GHz e 1,61 para 90 GHz, sendo que, para qualquer valor acima de 1,0 podemos considerar a distribuição assimétrica). Para tanto comparamos a distribuição para 2012/2013 da figura 4.3.3 com os dados mostrados nas figuras 4.1.7 e 4.1.8.

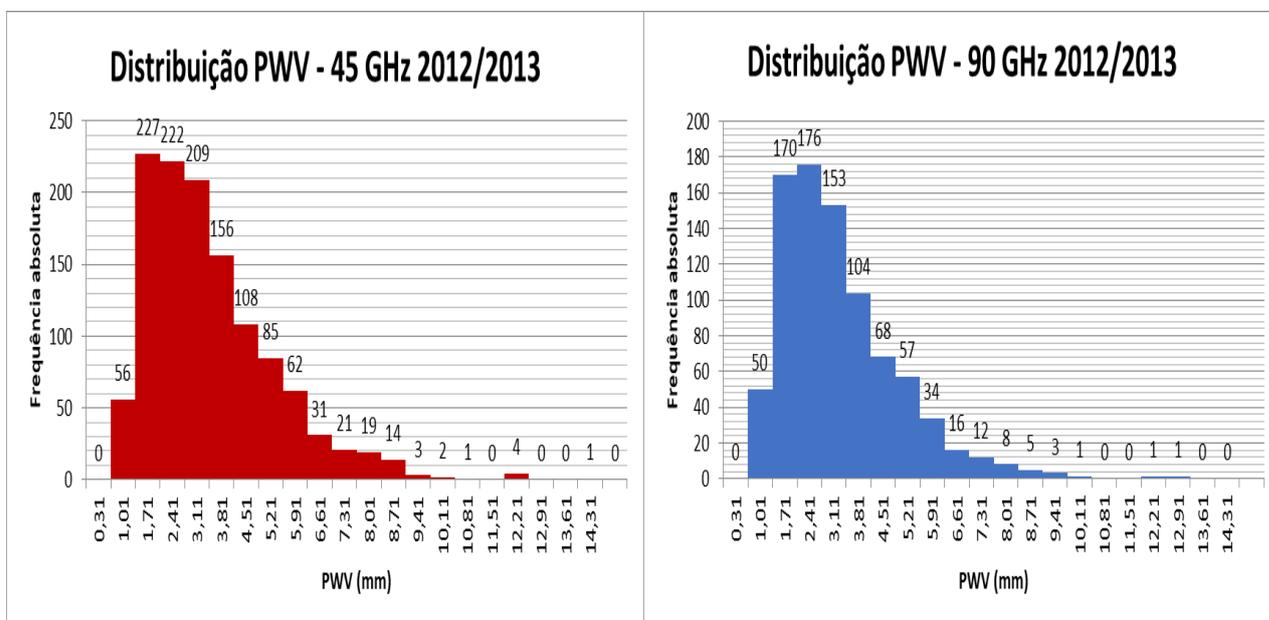


Figura 4.3.3 - Histograma da distribuição anual do PWV para 45 e 90 GHz – 2012/2013 (autoria própria)

Dessa forma, pudemos relacionar então, a opacidade com o os valores de PWV, encontrando um ajuste linear (Gaut,N.E.,Reifenstein,E.C.,1971) que relaciona ambas variáveis. Portanto, nos gráficos mostrados a seguir, nas figuras 4.3.4 e 4.3.5 são expressas essas relações e seus ajustes lineares para as frequências de 45 e 90 GHz no período do biênio de 2012/2013.

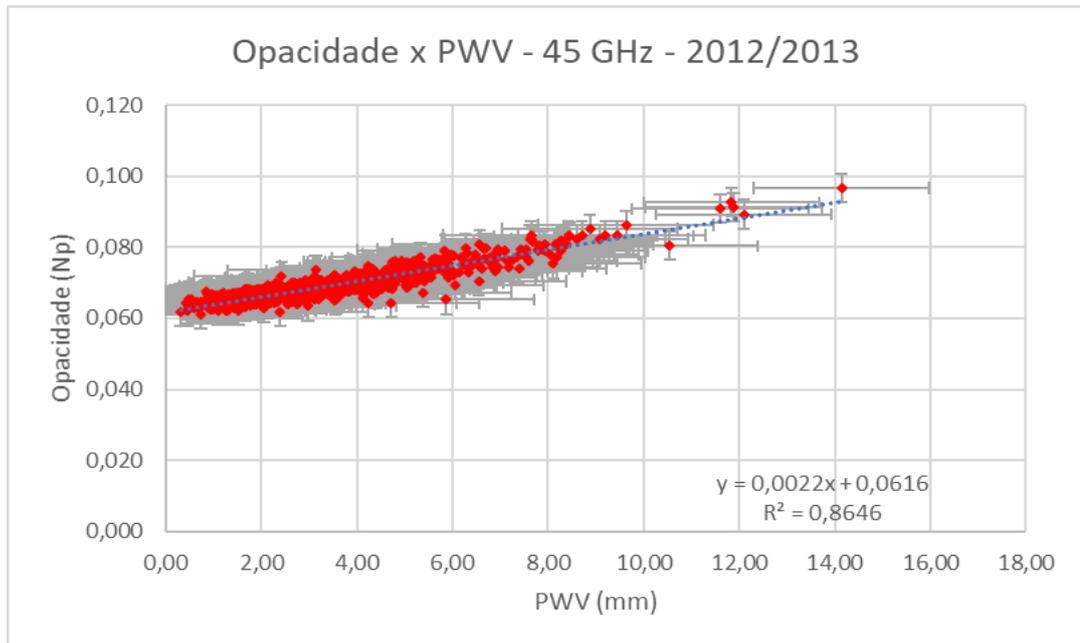


Figura 4.3.4 - Gráfico da relação entre a opacidade e PWV para 45 GHz – 2012/2013 (autoria própria)

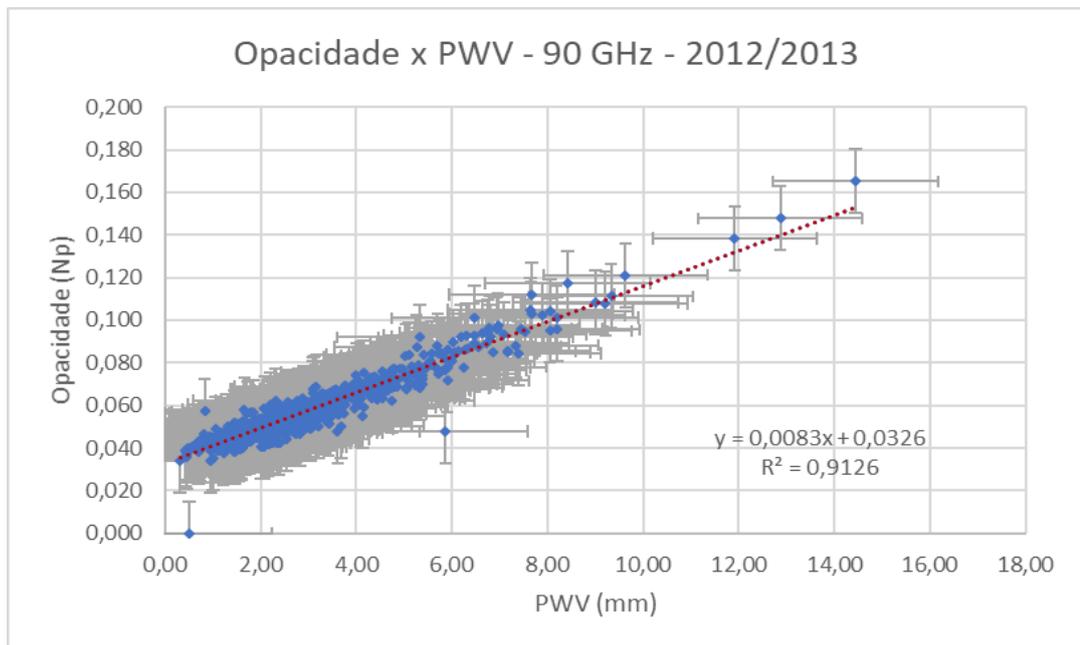


Figura 4.3.5 – Gráfico da relação entre a opacidade e PWV para 90 GHz – 2012/2013 (autoria própria)

Ambos os ajustes tinham um bom valor de R^2 , sendo o ajuste dado de 45 GHz dado pela expressão: $\tau_{45} = (2,2 \times 10^{-3} \pm 2,3 \times 10^{-5}) \cdot \text{PWV} + (6,2 \times 10^{-2} \pm 8,5 \times 10^{-5})$ e para 90 GHz $\tau_{90} = (8,3 \times 10^{-3} \pm 7,9 \times 10^{-5}) \cdot \text{PWV} + (3,3 \times 10^{-2} \pm 2,7 \times 10^{-4})$.

Durante todo o estudo feito para a obtenção das opacidades para ambas as frequências, sempre o valor da opacidade para 90 GHz é menor, e em alguns momentos, como na estação úmida, quase se igualam. Fato que contraria o esperado teoricamente, pois o que era esperado é que conforme se aumenta a frequência de observação se aumenta a opacidade. No caso de El Leoncito isso, como já expusemos acima, não acontece, porém conforme foram abertos e compilados os dados, percebeu-se que acima de um certo valor de PWV, a relação se invertia. De tal modo, para investigar esse fenômeno, e caracterizar melhor o próprio sítio de investigação, tentamos encontrar qual era o valor do ponto de inversão entre as duas frequências para os dados de 2012/2013. Portanto, de modo simples, a primeira solução encontrada foi mostrar em um mesmo gráfico as duas relações encontradas nas figuras 4.3.4 e 4.3.5. Ao se igualar as equações encontrava-se o valor do ponto. Ao realizar tal procedimento, encontramos que esse valor era $4,75 \pm 0,10$ mm. Tal relação pode ser observada na figura 4.3.6.

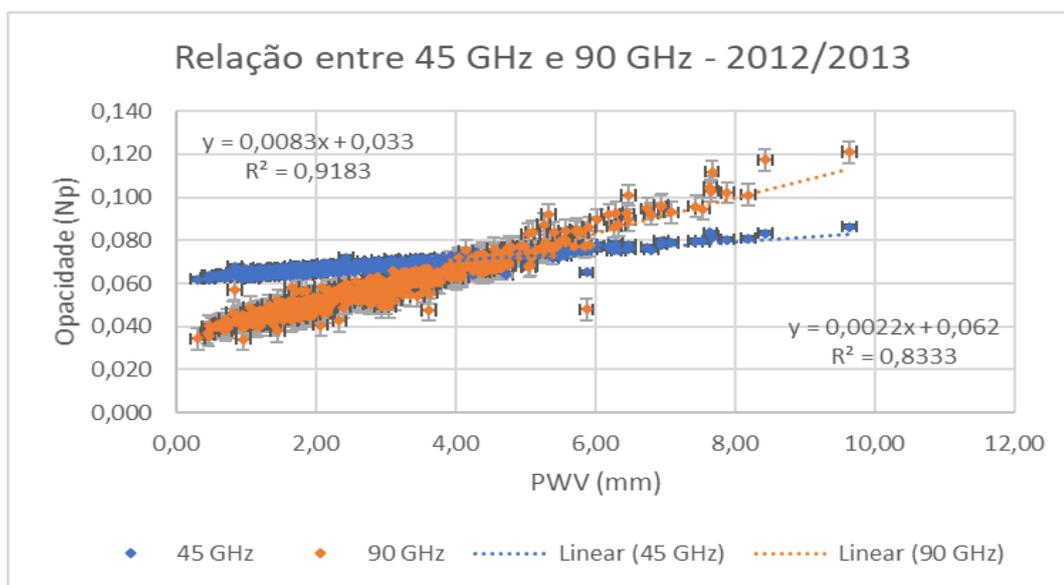


Figura 4.3.6 – Gráfico da relação entre a opacidade e PWV para 45 e 90 GHz – 2012/2013 (autoria própria)

De modo análogo, pode-se encontrar esse valor de inversão construindo-se um gráfico onde compusemos a razão entre as opacidades e o PWV. Ao se interceptar essa relação com a assíntota igual à 1, esse era o valor da inversão procurado. Construído o gráfico, foi feito um ajuste exponencial para a relação encontrada (mas, tentamos outros ajustes que foram igualmente bons, mas devido a

expressão da opacidade ser exponencial preferimos esse ajuste). Nesse caso, os gráficos das razões τ_{90} / τ_{45} e τ_{45} / τ_{90} são dados nas figuras 4.3.7 e 4.3.8 a seguir.

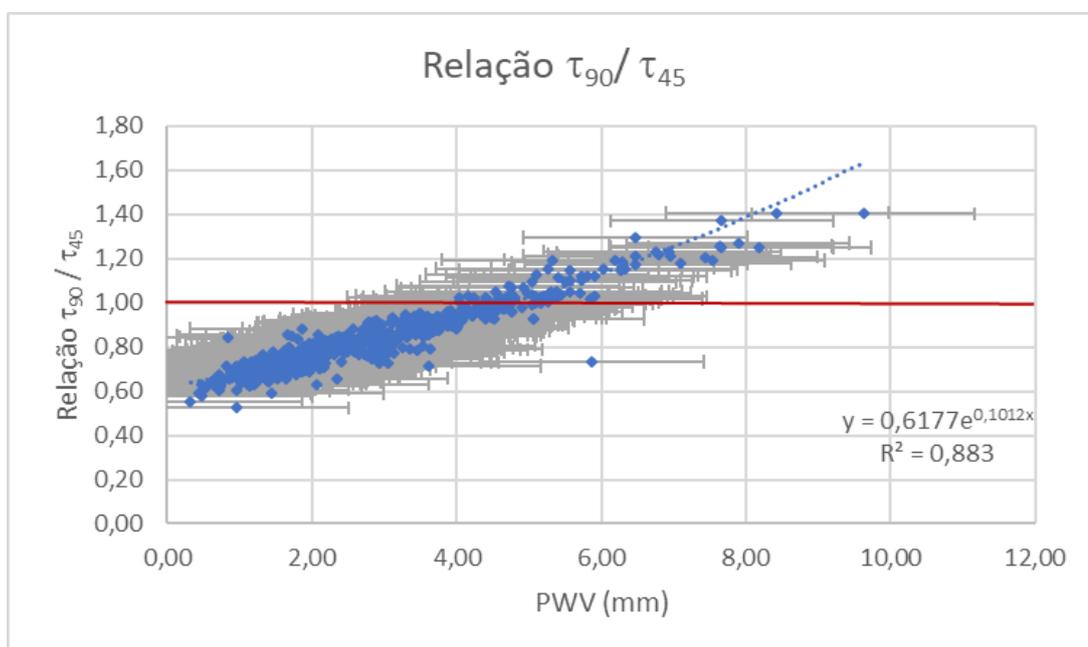


Figura 4.3.7 – Gráfico da relação entre a razão das opacidades e PWV para 2012/2013 (autoria própria)

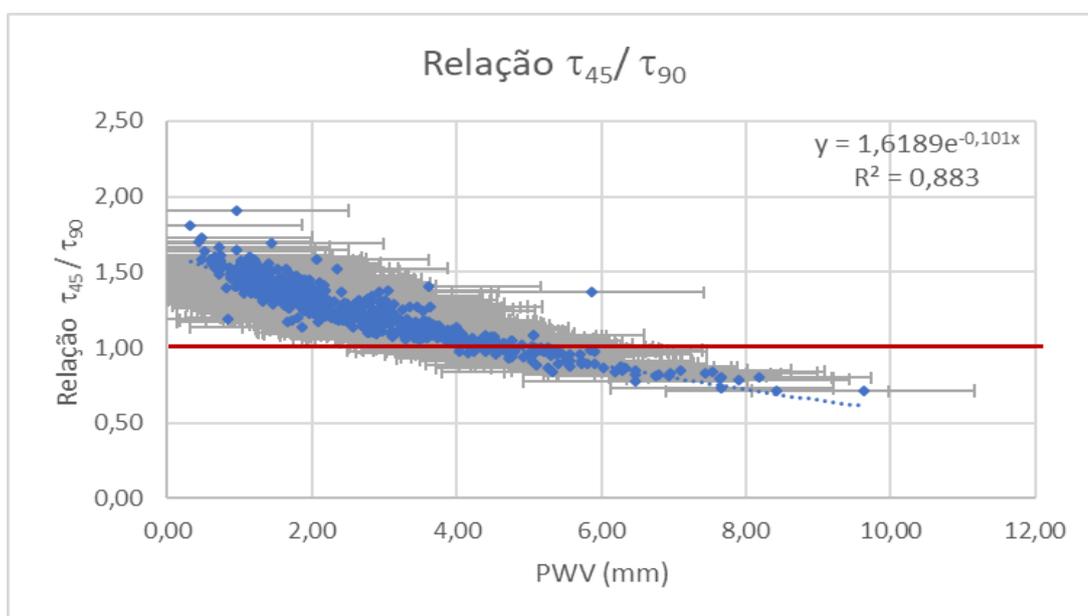


Figura 4.3.8 – Gráfico da relação entre a razão das opacidades e PWV para 2012/2013 (autoria própria)

Era esperado que a relação encontrada para a expressão de τ_{90} / τ_{45} (figura 4.3.7) fosse uma exponencial decrescente, pois em geral as opacidades são maiores para frequências maiores, o que não ocorreu devido ao fato das opacidades de 90

GHz serem menores que 45 GHz na maior parte das medidas, coincidindo apenas com as medidas da estação úmida, (conforme pode ser visto em 4.3.1 e 4.3.2), mas ao se construir a relação inversa (τ_{45} / τ_{90} , apresentado na figura 4.3.8) se obteve o comportamento esperado. Resolvendo as equações dos ajustes para $y = 1$, que implicaria no valor para o qual as frequências são iguais para o ajuste exponencial, obtivemos os valores para inversão de $4,76 \pm 0,10$, para a razão τ_{90} / τ_{45} e $4,79 \pm 0,10$ para a razão τ_{45} / τ_{90} que estavam em concordância com o primeiro valor obtido para a expressão que era de $4,75 \pm 0,10$.

Portanto, como a média do PWV entre nos dois anos estudados foram de 3,96 mm para 2012 e 4,33 mm para 2013, e o valor obtido para inversão era entre 4,75 e 4,79 mm, somente em alguns momentos de maior aumento no PWV, em qualquer estação do ano (mas, com maior probabilidade para estação úmida), os valores das frequências se invertiam, ou seja, o valor para opacidade de 90 GHz era maior que o valor da opacidade de 45 GHz conforme esperado na literatura.

4.4 Aplicando o programa ATM em El Leoncito

Com o intuito de se compreender melhor a dinâmica da opacidades para as frequências operadas pelo POEMAS, utilizamos um programa de simulação dos valores da opacidade, o ATM – *Atmospherical Trasmision at Microwaves*, que se utiliza do modelo da transferência radiativa e banco de dados para as espécies químicas mais importantes na composição da opacidade, para obter um valor teórico segundo o programa, para El Leoncito.

Em nosso caso, variamos apenas um parâmetro, que foi o PWV, que influenciava o valor da opacidade como esperado na literatura (Otárola, et al.,2010) pois os valores de oxigênio e de componentes minoritários na composição atmosférica para a altitude em El Leoncito poderiam ser considerados constantes.

Dessa forma, selecionou-se a altitude de 2,5 Km, que é próximo ao valor de altitude de onde se situa o POEMAS (2.550m) e fizemos testes para três situações propostas pelo programa: Verão, Inverno e Primavera/Outono. Outros parâmetros possíveis de ajuste foram mantidos constantes devido ao nosso intuito de observar somente a relação entre o PWV para a faixa de 1 a 6 mm (que compreende a

quantidade de vapor de água onde ocorre a inversão das frequências em relação ao valor da opacidade). Sendo assim, a altura da escala de vapor de água H (sendo H definido como a altura onde o valor do vapor de água diminui valor de “1/e”) que foi deixada como constante com valor de 2.0 km (apesar do estudo feito por Cassiano et. al., 2018 indicar que esse valor é menor para o CASLEO), a massa de ar com o valor 1.00, umidade relativa de 30%. Para cada estação, quando selecionada a estação do ano em estudo, era selecionado automaticamente o valor para a temperatura e pressão relacionados ao modelo correspondente que faz parte do pacote do ATM, mesmo sabendo que essas não eram as temperaturas esperadas para o CASLEO fizemos a simulação.

Segundo o programa, para a faixa de operação do POEMAS, a opacidade local total simulada era composta por uma soma das opacidades causadas pelo oxigênio, pelo vapor de água e pelos componentes minoritários da atmosfera simulada em proporções diferentes também designadas pelo programa .

Os resultados obtidos, bem como os parâmetros utilizados foram os descritos a seguir, sendo que o valor de PWV variou de 0,5 mm a partir de 1,00 até 6,0 mm.

Verão

Temperatura: 9,3 °C (temperatura registrada pelo programa para o verão no caso de o PWV ser 1,0 mm).

Pressão: 754,8 mbar (pressão registrada pelo programa para o verão no caso de o PWV ser 1,0 mm).

Para essa estação os valores da opacidade devido ao oxigênio era 0,07358 Np e para componentes minoritários na atmosfera era de 7×10^{-5} Np e se mantinham constantes durante toda a simulação para 45 GHz. Os valores obtidos para a simulação da opacidade total variaram de 0,076 a 0,088 Np, para um intervalo de 1,00 até 6,00 mm, que são valores médios esperados para a estação de verão. Tais valores possuíam concordância razoável com os valores obtidos através desse estudo que foi de 0,069 Np para a mediana, 0,070 e desvio padrão de 0,006 Np.

Já para a frequência de 90 GHz, o valor da opacidade referente ao oxigênio era de 0,00992 Np e os componentes minoritários era de 6×10^{-5} Np. A opacidade apresentou um resultado experimental de 0,061 Np para mediana, 0,065 Np para a média e desvio padrão de 0,022 Np. A concordância foi bem melhor para o intervalo de PWV entre 1,00 mm e 6,00 mm, sendo que o valor da opacidade simulada variou

entre 0,049 Np até 0,091 Np. As variações devido a componente da opacidade ligadas a opacidade de vapor de água são mostradas no gráfico da figura 4.4.1.

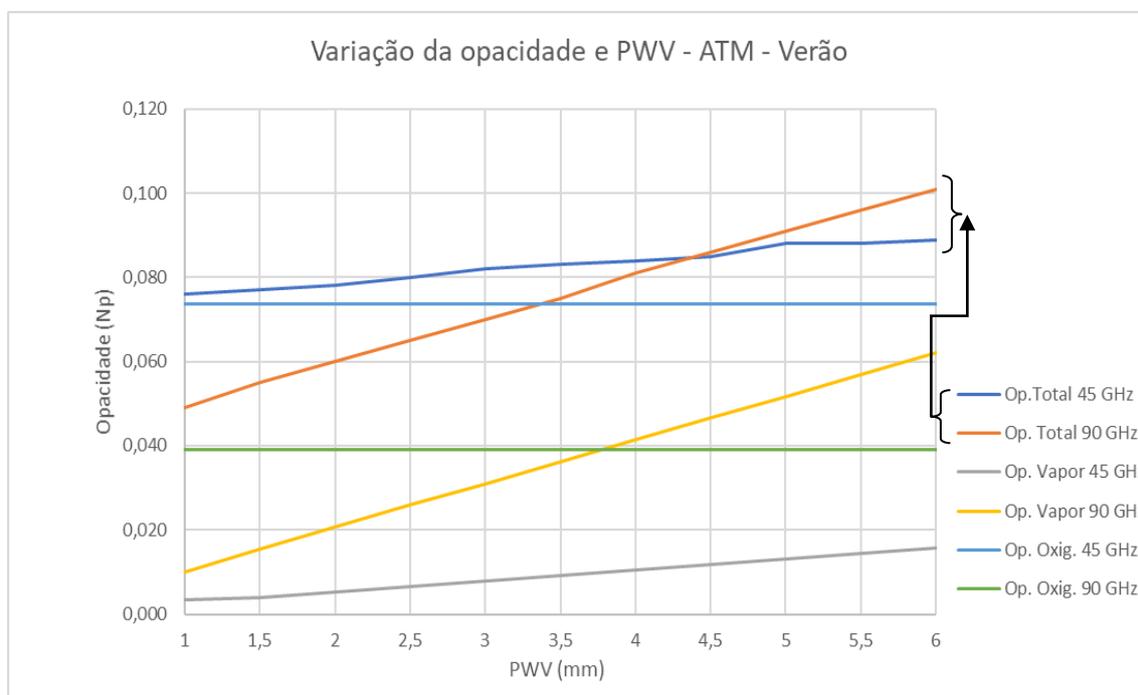


Figura 4.4.1 – Gráfico da variação entre opacidade e PWV simulação ATM - Verão (autoria própria)

Foi possível observar pelo gráfico da fig. 4.4.1, que a opacidade é dependente da variação do PWV, porém a frequência de 45 GHz é menos sensível a essa variação do que a de 90 GHz, pois na composição da opacidade total, o valor da quantidade da opacidade devido ao vapor de água cresce muito lentamente (linha vermelha), diferente do que foi observado para 90 GHz (linha laranja). A variação mais rápida opacidade de vapor de água para a frequência de 90 GHz demonstra a maior sensibilidade a este componente. Foi possível observar o valor de inversão das frequências que parecia estar entre o intervalo de $4,75 \pm 0,10$ mm e $4,79 \pm 0,010$ mm.

Foi feito um teste para a temperatura média de verão no CASLEO que é de $26,0^{\circ}\text{C}^3$, porém o programa corrigia automaticamente o valor inicial do PWV para 15,2 mm, fora do intervalo de observação da inversão dos valores. Dessa forma, observou-se que os valores da opacidade de 45 GHz eram menores que os valores de 90 GHz. Tal resultado era esperado (pois a quantidade de PWV era bem maior

³ Valor média dos valores obtidos no site: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/argentina/san-juan/san-juan-1913/>

do que o valor de inversão). Assim, o valor da opacidade começa com 0,076 Np, que é um valor, dentro dos desvios padrão para a média do verão, $0,070 \pm 0,007$ Np. Porém, esses valores variam de forma lenta (como visto anteriormente nos testes para valores menores de 6,0 mm) para valores até 0,092 Np, quando o PWV é 24,0 mm. O que não aconteceu com a frequência de 90 GHz, pois seu valor inicial para o valor de 15,2 mm é de 0,136 Np, muito maior que os valores esperados para o verão obtidos na análise experimental, que foram de $0,068 \pm 0,019$ Np (2012), $0,068 \pm 0,023$ Np (2013) e $0,070 \pm 0,022$ Np. Podemos observar os comportamentos da opacidade total, opacidade devido ao oxigênio e ao vapor de água para as duas temperaturas no gráfico da figura 4.4.2 a seguir.

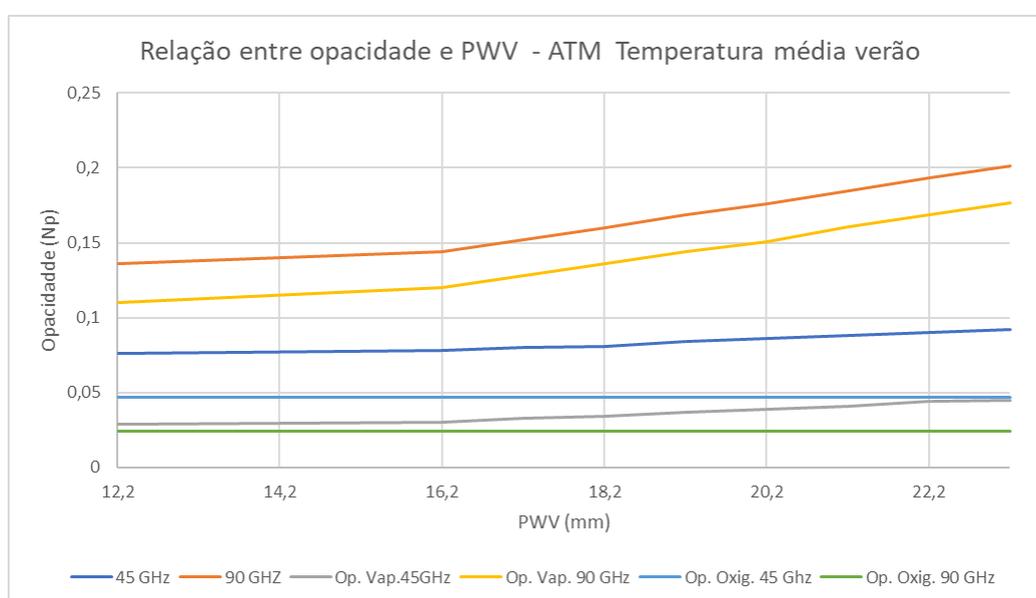


Figura 4.4.2 – Gráfico da variação entre opacidade e PWV simulação ATM – Temperatura média verão (autoria própria)

Inverno

Ainda utilizando os mesmos parâmetros constantes para H, umidade relativa e massa de ar, o programa na versão inverno para o valor de PWV selecionava automaticamente a temperatura de $-9,6$ °C e a pressão de 740,3 mbar.

Após compilar o programa, se observou pelo modelo, que os valores da componente da opacidade para o oxigênio tinham um valor constante de 0,06516 Np e as componentes tinham valor de opacidade de 6×10^{-5} Np, e se mantinham constantes durante as simulações. Os valores da opacidade para 45 GHz variavam de 0,068 até 0,073 Np no intervalo de PWV de 1,00 até 6,0 mm. O que possui boa concordância com os valores experimentais do período que foi de 0,067 Np para a

mediana 0,068 Np para a média com desvio padrão de 0,003 Np. E de 0,045 e 0,064 Np para 90 GHz no intervalo de PWV entre 1,00 até 6,0 mm, que também tinha boa concordância com o valor experimental que foi de 0,049 Np para a mediana, 0,052 Np para a média e desvio padrão de 0,011 Np. Tanto para 45 GHz e 90 GHz as composições de oxigênio e componentes menores da opacidade se mantiveram constantes nos valores de 0,06516 Np e 6×10^{-5} Np para 45 GHz e 0,03455 Np e 6×10^{-5} Np. Sendo que o valor da opacidade para vapor de água era o fator do aumento no valor total da opacidade como podemos observar no gráfico da figura 4.4.3.

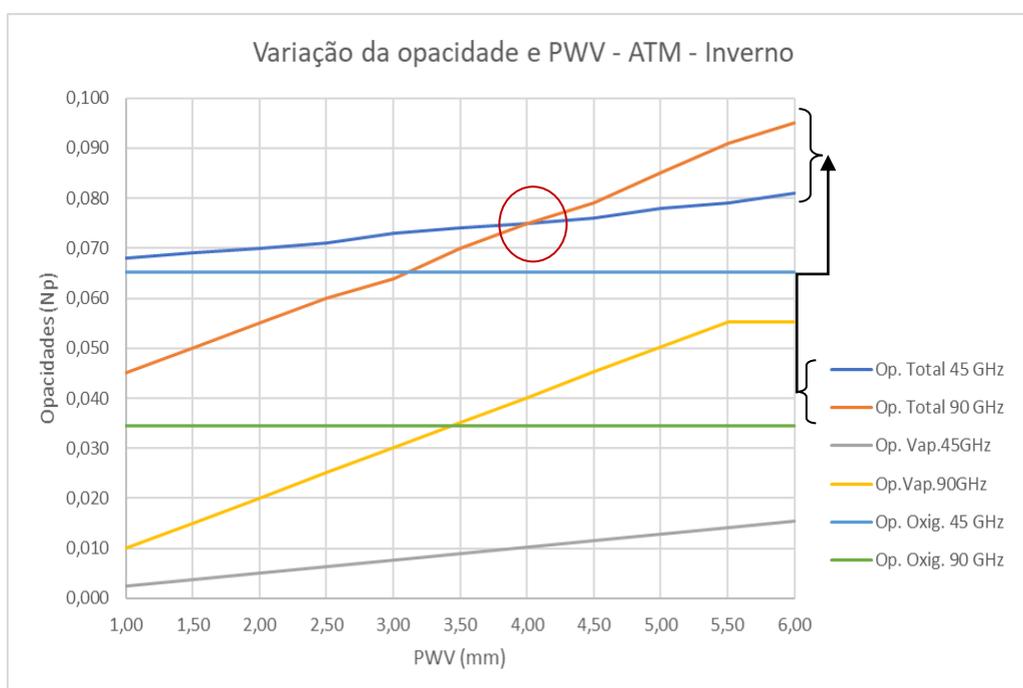


Figura 4.4.3 – Variação da opacidade com relação ao PWV – inverno (da autora)

Da observação do gráfico da figura 4.4.3 vimos que a frequência de 90 GHz era mais sensível à variação do conteúdo de vapor de água do que a de 45 GHz e que a inversão dos valores das opacidades entre as frequências se davam em 4,00 mm, próximo, mas não coincidente nem com o desvio padrão, para o que foi obtido como valor de inversão para os valores de PWV, que variavam de 4,75 e 4,79 com desvio padrão de 0,10 mm. O comportamento de maior crescimento da opacidade de vapor de água para 90 GHz aqui também se repetiu. Também se pode observar o valor onde o PWV se inverte, próximos aos obtidos experimentalmente $(4,75-4,79) \pm 0,10$ mm, conforme o circulado na figura 4.4.3.

Da mesma forma, foi feito um estudo para a temperatura média do CASLEO no inverno³ (que é de aproximadamente 10°C na média) e o programa no ajuste inverno colocou um valor mínimo de PWV de 5,7 mm com valor inicial de opacidade de 0,061 Np e valor de 0,080 Np (14,7 mm) para 45 GHz, onde pelo menos o valor inicial, se encontrava dentro do desvios padrão para os valores experimentais são bem razoáveis (médias $0,064 \pm 0,010$ Np – 2012, $0,068 \pm 0,004$ NP – 2013 e $0,065 \pm 0,010$ Np para 2012/2013). E, para a frequência de 90 GHz, com o PWV mínimo de 5,7, o valor já se inicia em 0,072 Np, que é próximo do limite máximo para o desvio padrão das médias dos dados experimentais: 2012 – $0,055 \pm 0,010$ NP, 2013 – $0,055 \pm 0,016$ Np e para 2012/2013 $0,055 \pm 0,010$ NP. Porém para 14,7 mm, que foi o valor máximo que fizemos o teste, a opacidade simulada tem valor de 0,145 NP, fora dos desvios padrão para os valores experimentais. Esse comportamento pode ser visto no gráfico da figura 4.4.4 abaixo.

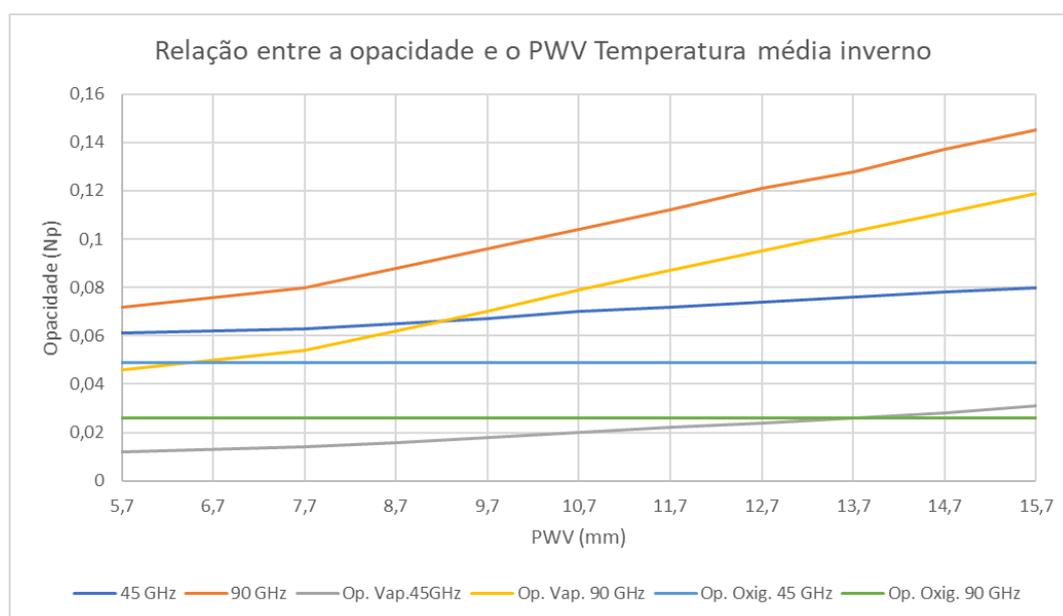


Figura 4.4.4 – Variação da opacidade com relação ao PWV – Temperatura média inverno (da autora)

Outono/primavera

Nesse caso, quando se tratava do Outono ou Primavera, sempre o programa simulava a estação do outono e nesse caso, a temperatura da simulação era de -0,1°C, e a Pressão atmosférica de 747,6 mbar. Os outros parâmetros foram mantidos constantes como no verão.

No caso do outono/primavera, tivemos que relacionar o resultado da simulação para as duas estações e para as duas frequências com os resultados dos dados experimentais. Dessa forma, iremos mostrar através da tabela 4.4.1.

Para essas estações o valor da opacidade devido ao oxigênio era de 0,06915 Np e dos outros componentes minoritários era de 7×10^{-5} Np para 45 GHz, e para 90 GHz tinha-se 6×10^{-5} Np para os componentes minoritários e 0,03673 Np para a componente ligada ao oxigênio.

Relação entre opacidades experimentais e do intervalo da simulação

Estação do ano	Frequência (GHz)	Mediana (Np)	Média (Np)	Desvio padrão (Np)
Outono 2012/2013	45	0,068	0,069	0,005
	90	0,055	0,058	0,013
Primavera 2012/2013	45	0,067	0,065	0,010
	90	0,053	0,055	0,010
Simulação		Intervalo - τ (Np)	Intervalo - PWV (mm)	
	45	0,072 – 0,082	1,00 – 6,00	
	90	0,047 – 0,088	1,00 – 6,00	

Tabela 4.7 – Relação entre opacidade experimentais e a simulação ATM (da autora)

Para a estação do outono, com relação a média e a mediana, o valor da simulação, quando aplicado o valor do desvio padrão, concordou bem, para 45 GHz, porém para 90 GHz, a concordância era melhor. Já para a primavera, os valores também, dentro intervalo proporcionado pelo desvio padrão dos valores de opacidade concordaram bem para 45 GHz e 90 GHz.

As variações dos valores da opacidade em função do PWV obtidos pela simulação do programa ATM são dados na figura 4.4.5.

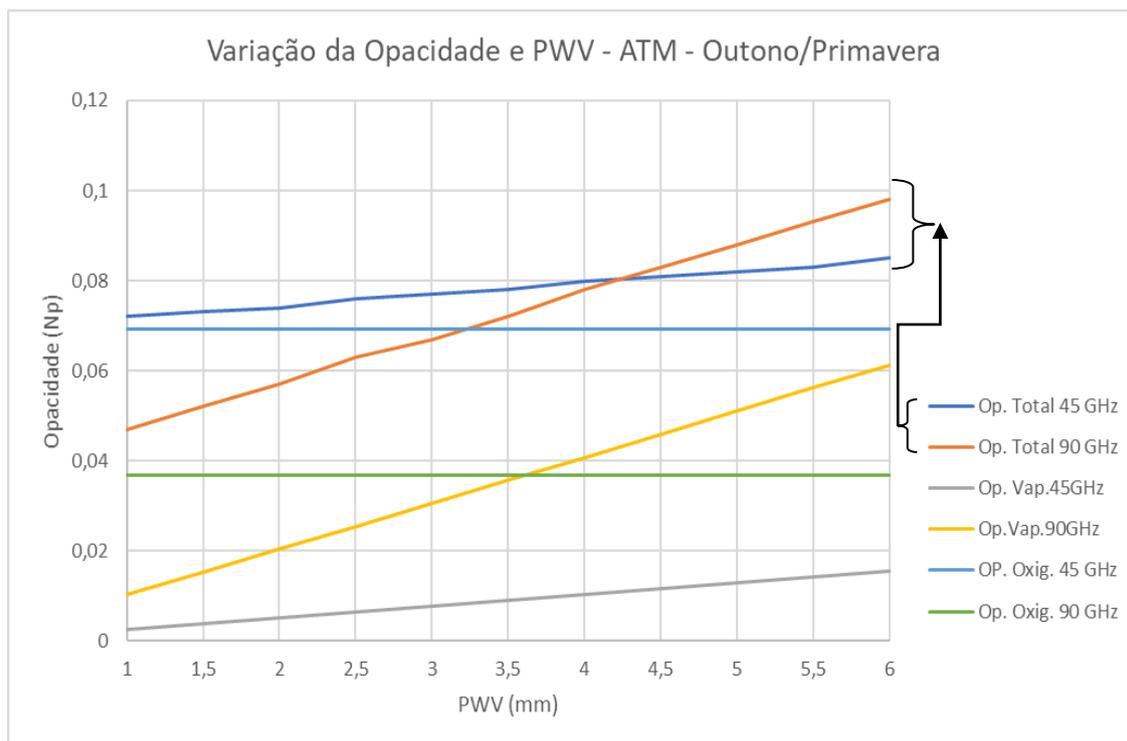


Figura 4.4.5 – Variação da opacidade com relação ao PWV – outono/primavera (da autora).

Para essa estação também fizemos uma simulação para a temperatura média dessas estações no CASLEO, usando o valor de $16,0^{\circ}\text{C}^3$ e mantendo os valores de H, umidade relativa e massa de ar conforme os descritos como constantes nas simulações anteriores. Nesse caso, o programa já iniciava com um valor de PWV de 8,3 mm e uma opacidade de 0,065 Np para 45 GHz, variado até um valor máximo de 17,3 mm, onde o valor de opacidade é de 0,084 Np, concordando bem, pelo menos para os valores iniciais da simulação com os valores experimentais médios do outono e da primavera: primavera 2012/2013 – $0,065 \pm 0,010$ Np e $0,069 \pm 0,005$ Np para o outono. No caso da frequência de 90 GHz os resultados simulados eram bem diferentes sendo, como no caso do inverno, próximos, mas não coincidentes com o extremo superior dos desvios padrão para os valores experimentais. Para essa frequência a opacidade inicial para o PWV de 8,3 mm era de 0,091 Np variando até 0,162 Np para 17,3 mm. Sendo os valores experimentais médios dados por $0,058 \pm 0,013$ Np para o outono 2013/2013 e $0,055 \pm 0,010$ Np para a primavera de 2012/2013. Resultado que pode ser observado no gráfico da figura 4.4.6.

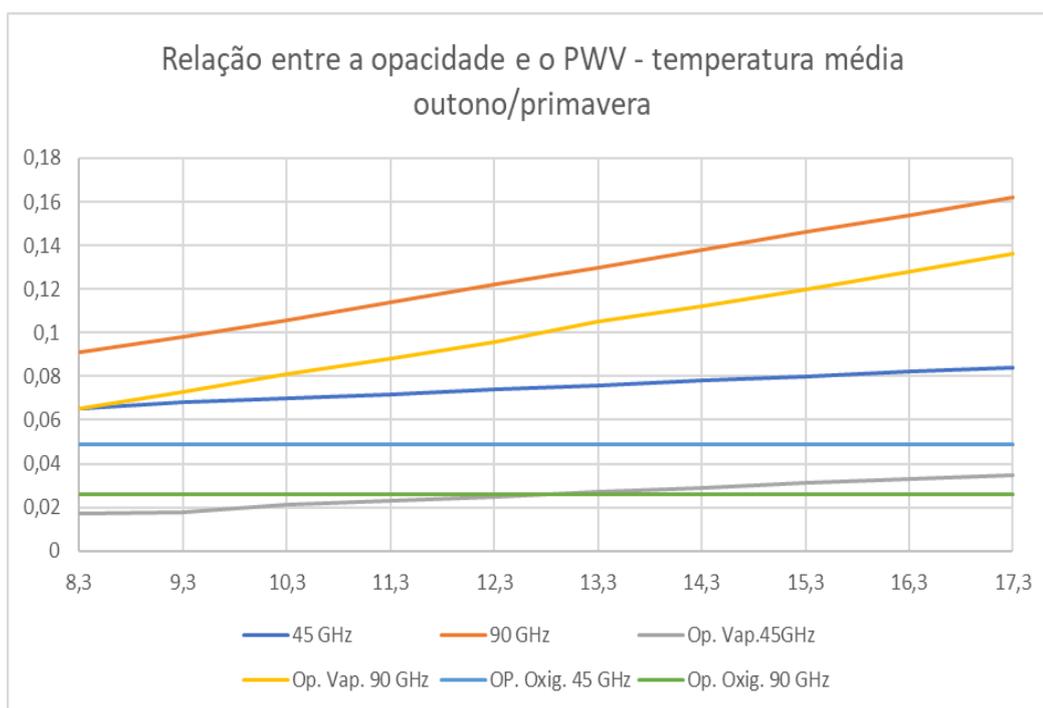


Figura 4.4. – Variação da opacidade com relação ao PWV – Temperatura média outono/primavera (da autora).

Portanto, quando relacionamos os dados obtidos pela simulação produzida pelo programa ATM variando apenas o PWV entre 1,0 e 6,0 mm e deixando todos os outros parâmetros sendo selecionados pelo programa para a estação em questão, e o resultado experimental percebeu-se que, dentro dos intervalos produzidos pelos desvios padrão de cada frequência, para as estações do outono, inverno e primavera e verão possuíam boa concordância.

Depois, ao fazer as simulações com a temperatura média esperada para cada estação do ano no CASLEO, o programa travava um valor mínimo para PWV e também pode-se perceber a sensibilidade maior ao vapor de água para a frequência de 90 GHz do que para a de 45 GHz, que variava menos o valor da opacidade mesmo para valores maiores de PWV, e que, para esses valores de temperatura e PWV, a inversão entre os valores de opacidades já tinha se operado, sendo assim, os valores de opacidade para 45 GHz, menores do que 90 GHz, da mesma forma que ocorre com o SST, entre as frequências de 212 e 405 GHz (Cornejo Espinoza, 2017 e Cassiano et. al., 2018). Mesmo assim, dentro dos limites superiores dos desvios padrão das medidas experimentais havia uma boa concordância para a frequência de 45 GHz, mas devido a maior sensibilidade da frequência de 90 GHz o mesmo não aconteceu.

Mas, observando os dados do PWV e as temperaturas médias do CASLEO, nos pareceu que a temperatura pode ser maior do que o proposto no programa para cada estação, porém, os valores de PWV parecem ser menores dos que os ajustados automaticamente no programa e mesmo assim, ainda os valores simulados são bem próximos dos experimentais.

Para finalizar fizemos um teste simulado no modo SPEC do programa ATM, que nos produziu dados onde apenas variando o valor de PWV entre 1,0 e 5,0 mm, para a estação inverno, observando como variava o valor da opacidade com relação a frequência entre 10 GHz e 100 GHz, usando constantes os valores da altitude, H, umidade relativa do ar e massa de ar conforme os testes iniciais e o resultado é dado no gráfico da figura 4.4.7.

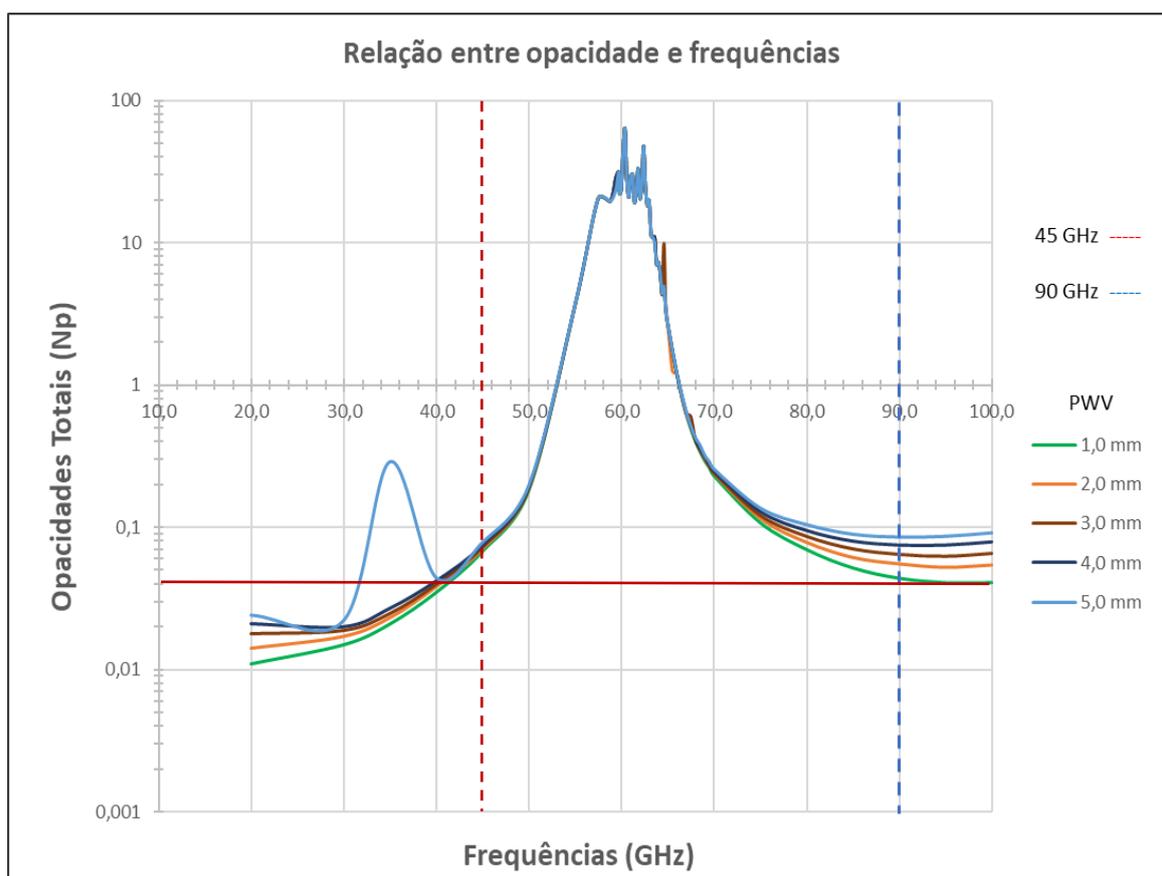


Figura 4.4.7 – Relação entre a opacidade e as frequências (da autora).

Sendo que, podemos observar que os valores de opacidade para 45 GHz são muito próximos entre si, independente dos valores de PWV entre 1,0 mm e 5,00 mm. Diferente do comportamento para 90 GHz que a opacidade parece ser dependente do PWV nesse intervalo. E que, até 4,0 mm, os valores das opacidades

de 45 GHz são maiores que as de 90 GHz, sendo que o valor para a inversão ocorre entre $4,5 \pm 0,010$ e $4,7 \pm 0,01$ mm.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 Conclusões

Os resultados obtidos através do estudo estatístico para opacidade nas frequências de operação do POEMAS para o biênio de 2012/2012 foi de 0,068 Np para o valor da mediana e 0,069 Np para média com desvio padrão de 0,005 Np para a frequência de 45 GHz e 0,053 Np para a mediana e 0,057 Np para a média com desvio padrão de 0,015 Np. Houve pouca variação desses valores para cada ano em separado conforme se pode ver na tabela 4.2 (página 50). Também, na mesma tabela, vemos que os desvios padrão entre as duas frequências se relacionam muitas vezes em um fator de 3, mostrando que a frequência de 90 GHz é mais ruidosa que a de 45 GHz.

Da análise sazonal, podemos observar que há pouca variação no valor da opacidade de 45 GHz durante as diversas estações, sendo pouco existente para essa frequência a existência de uma estação úmida ou seca. Porém, para a frequência de 90 GHz, há uma variação maior no valor da opacidade, sendo que a mesma, quase apresenta o mesmo valor de opacidade que 45 GHz no verão e tem um decréscimo conforme a umidade diminui devido ao clima (diminuição de PWV) chegando a um valor mínimo no inverno. Portanto, para

essa frequência há sim, uma diferença para a estação seca e a estação úmida. Foi observado que os valores de opacidade para 45 GHz eram maiores que os de 90 GHz durante a maior parte do ano, sendo exceções os valores encontrados para a estação do verão e o mês de janeiro de ambos os anos estudados, comportamento que contraria o esperado na literatura (Hiriart,1997; Ulich,1980). As variações mensais e sazonais podem ser vistas nos gráficos das figuras 4.2.1 e 4.2.2 (páginas 60 e 61).

Devido a esse comportamento, que poderia estar atrelado com a variação do PWV durante o ano, foi feito um estudo da relação entre a opacidade e o PWV em uma outra seção do trabalho.

Também se encontrou uma relação entre as opacidades nas duas frequências de operação, colocando-se a frequência de 90 GHz em função da de 45 GHz, pelo fato da frequência de 45 GHz ser menos ruidosa e ter apresentado mais dados. Dessa forma, o ajuste encontrado para nuvem de pontos para os anos de 2012/2013 foi $\tau_{90} = (3,384 \pm 0,041) \cdot \tau_{45} - (0,173 \pm 2,9 \times 10^{-3})$. Sendo, a menos de uma constante, o valor da opacidade para a frequência de 90 GHz era três vezes maior que o de 45 GHz. Constante essa, que pode estar ligada ao recorte escolhido para o trabalho ou ser característica do próprio sistema físico.

Foi feita uma análise estatística para a distribuição do PWV durante o período de estudo, e o mesmo apresentava valores mais altos durante os meses da estação úmida que diminuía na estação seca coincidindo com o mesmo comportamento da opacidade, corroborando assim, para afirmarmos que há sim, uma dependência entre a variação do PWV e os valores da opacidade (que já era conhecido na literatura), porém para o caso das frequências do POEMAS, o PWV afetava muito mais a frequência de 90 GHz que a de 45 GHz. Encontrou-se então uma relação entre a opacidade e o PWV para as duas frequências sendo que para a frequência de 45 GHz esse ajuste foi dado por $\tau_{45} = (2,2 \times 10^{-3} \pm 2,3 \times 10^{-5}) \cdot \text{PWV} + (6,2 \times 10^{-2} \pm 8,5 \times 10^{-4})$ e $\tau_{90} = (8,3 \times 10^{-3} \pm 7,9 \times 10^{-5}) \cdot \text{PWV} + (3,3 \times 10^{-2} \pm 2,7 \times 10^{-4})$ para 90 GHz no período estudado de 2012/2013. Com a manipulação dos dados se percebeu que a partir de determinado valor de PWV opacidades tinham um ponto de inversão, ou seja, a frequência de 90 GHz apresentava valores maiores que a de 45 GHz e através de um estudo simples de igualdade para equações de ajuste lineares e do

ajuste para a razão entre os valores das opacidades se obteve que esse valor de inversão estava dentro do intervalo $(4,75 - 4,79) \pm 0,10$ mm e isso pode ser visto nos gráficos das figuras 4.3.5, 4.3.6, 4.3.7 e 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3.

Para comprovação do resultado experimental, foi usado o programa ATM - V.1 para simular os valores de opacidade variando o valor de PWV desde 1,00 mm até 6,00 mm e obtendo os valores para as estações do Verão, Inverno e Outono/Primavera conforme é possível de ser visto na tabela 4.1.1. Com o teste, foi obtido que dentro do intervalo dado pelo desvio padrão dos valores experimentais, os valores simulados coincidiam bem para as estações do inverno, outono/primavera, principalmente para a frequência de 90 GHz (que apresenta um desvio padrão maior). No caso do verão ainda houve uma concordância próxima para 90 GHz e para 45 GHz.

Ao final desse estudo com o programa, se observou que para a frequência de 45 GHz em todas as estações do ano, a maior parte da opacidade total era devida a opacidade causada pelo oxigênio, sendo a contribuição da opacidade de vapor de água pequena e com crescimento pequeno ao se aumentar o PWV. Diferente da opacidade total para 90 GHz, a qual a composição de vapor de água já era importante para os valores iniciais e crescia mais rapidamente com o aumento do PWV, sendo esse fator a principal causa do ponto de inversão entre as duas frequências para valores entre $(4,75 - 4,79) \pm 0,10$ mm (o que pode ser visto nos gráficos das figuras 4.4.1, 4.4.3 e 4.4.5). Portanto é provável que a opacidade para 90 GHz se mantenha menor que a de 45 GHz para locais com valores de PWV menores que o intervalo mencionado acima. Sendo que o mesmo pode ser observado na figura 4.4.6 a seguir, que se refere ao espectro entre 10 e 100 GHz obtido pelo ATM.

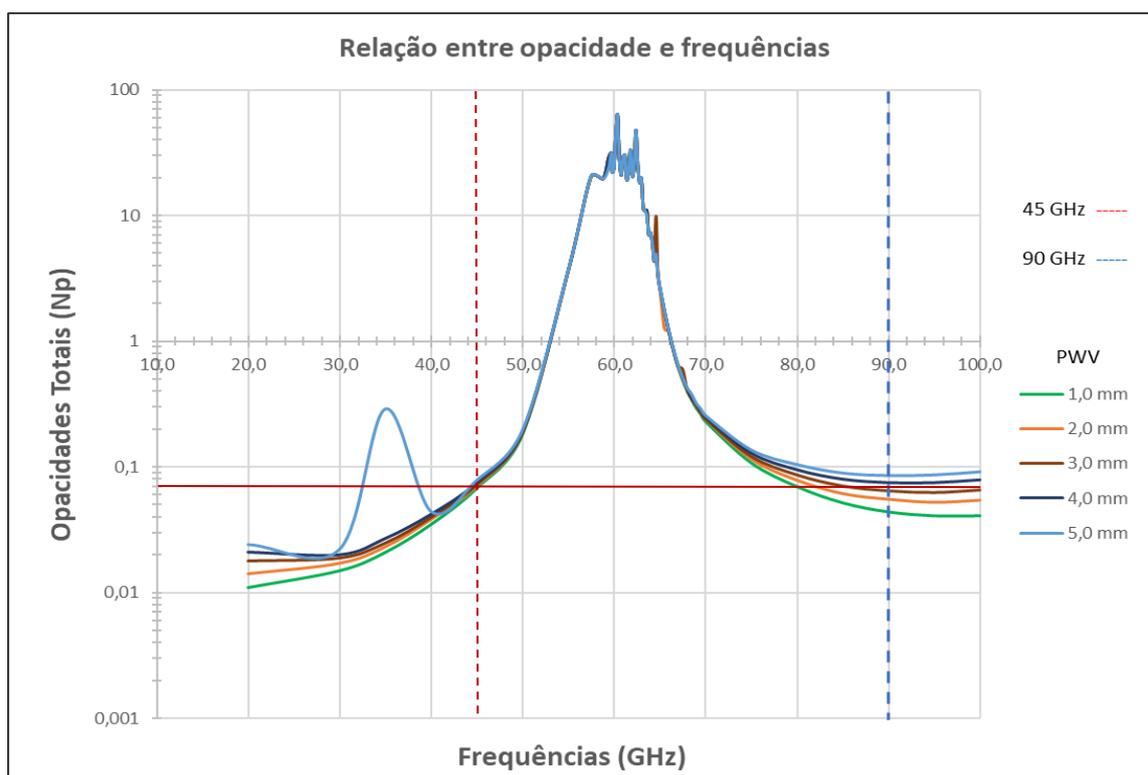


Figura 5.1.1 – Relação entre a opacidade e as frequências (da autora).

Assim, como o PWV do CASLEO anual para esses dois anos de medida tem média de 4,13 mm, se observa que a frequência de 45 GHz possui maiores valores de opacidade que a de 90 GHz, o que somente muda, como vimos em nosso estudo, para valores acima do intervalo de $(4,75 - 4,79) \pm 0,10$ mm. Sendo a frequência de 90 GHz, mais sensível à presença do vapor de água, conforme o observado nas simulações.

5.2 Perspectivas Futuras

Ainda há várias possibilidades para a continuação desse estudo, como por exemplo, utilizar o programa ATM (e outros simuladores) com parâmetros mais finos de temperatura, pressão e altura na escala de vapor de água para melhor caracterização e ajuste dos dados obtidos nesse trabalho, também se pode escolher outra forma de compor os dados de estudo baseados em outros critérios para confirmação dos resultados obtidos. Além disso, pode-se também utilizar os dados

que foram rejeitados pelo critério do corte com intuito de melhorar os ajustes para relação entre as duas frequências e as relações entre as opacidades e o valor do PWV. Também, com volta de operação do POEMAS, se fazer um estudo mais prolongado das opacidades obtidas por mais anos (principalmente observar em anos onde a ação do El Niño ou La Niña podem trazer ou não alterações significativas no PWV). E por fim, pode-se realizar um estudo relacionando as opacidades do POEMAS com as do SST.

5.3 Agradecimentos Finais

Gostaria deixar meus agradecimentos às modificações sugeridas pelos professores Prof. Dr. Pedro Paulo Beaklini e Prof. Dr. Jean Pierre Raulin. Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Guillermo G. de Castro pela paciência e pela disponibilidade sempre ante as minhas dificuldades e aprendizado. Agradecemos aos pesquisadores do CASLEO, Eduardo Quel e Lidia Otero pelos seus esforços para estabelecer e manter os dados da Rede AERONET. E por fim, ao MACK Pesquisa e a CAPES pelo suporte financeiro dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

A Deepak, T.D. Wilkerson, and L.H. Ruhnke, 1980, "Atmospheric Water Vapor". Academic Press. Citado na página 27 (duas vezes)

Altyntsev, A.T., Fleishman, G.D., Huang, G.L., Melnikov, V.F.: 2008. "A Broadband Microwave Burst Produced by Electron Beams". *Astrophys. J.* **677**, 1367. Citado na página 19.

Cassiano, M. M., Cornejo Espinoza, D., Raulin, J.-P., Giménez de Castro, C. G., Mar 2018. Precipitable water vapor and 212 GHz - Atmospheric optical depth correlation at El Leoncito site. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 168, 32–36. Citado nas páginas 26, 73 e 80.

Cornejo Espinoza, D. V., Determinação da opacidade atmosférica em comprimentos de ondas submilimétricas - M.S. Dissertation, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brazil, 2017. Citado nas páginas 26, 80 e 88.

Correia, E., Kaufmann, P., Magun, A.: 1994. "The Observed Spectrum of the solar Burst Continuum Emission in the Submillimeter Spectral Range": Rabin, D.M., Jefferies, J.T., Lindsey, C. (eds.) *Infrared Solar Physics, IAU Symp.* **154**, 125. Citado na página 19.

Dickinson R.E. (1986) Effects of Solar Electromagnetic Radiation on the Terrestrial Environment. In: Sturrock P.A., Holzer T.E., Mihalas D.M., Ulrich R.K. (eds) *Physics of the Sun. Geophysics and Astrophysics Monographs*, vol 26. Springer, Dordrecht. Citado na página 17.

Duarte, et, al., 2017 – Theory and observation of the onset of nonlinear structures due to eigenmode destabilization by fast ions in tokamaks. *Physics of Plasmas* **24**, 122508 (2017); disponível em <<https://doi.org/10.1063/1.5007811>>. Citado na página 17.

Dulk, G.A. Radio Emission from the Sun and Stars, V. 23, p.169 – 224, 1985. Citado nas páginas 17 (duas vezes) , 19 e 21.

Gaut, N. E., Reifstein, E. C., 1971. Interaction Model of Microwave Energy and Atmospheric Variables. NASA Contracto Report 61348, Marshall Space Flight Center. Citado nas páginas 64 e 66.

Giovanelli, R., Darling, J., Henderson, C., Hoffman, W., Barry, D., Cordes, J., Eikenberry, S., Gull, G., Keller, L., Smith, J. D., & Stacey, G. 2001, *PASP*, **113**, 803 Citado na página 26.

Han, Westwater, 2000. Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-Based Microwave Radiometers. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, Vol. 38, No. 3, May 2000. Citado na página 27.

Hiriart, et al, 1997, Atmospheric Opacity at 215 GHz Over San Pedro Martir Sierra in Baja California. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* Vol, 33 p. 59-68 (1997). Citado nas páginas 32 e 76.

Kraus, J.D., 1986. *Radio Astronomy*, second ed. Cygnus-Quasar Books, Powell, Ohio. Citado nas páginas 23 e 24.

Kundu, M, R *Solar Radio Astronomy*. John Wiley and Sons, 1965. Citado nas páginas 15 (duas vezes), 17 e 23.

Melo, A. M. et al. Determination of submillimeter atmospheric opacity at El Leoncito, Argentina Andes. *Bulletin of the Astronomical Society of Brazil*, v. 23, p. 202–203, ago.2003. Citado na página 28.

Melo, A. M., Kaufmann, P., Gimenez de castro, C. G., Raulin, J.-P., Levato, H., Marun, A., Giuliani, J. L., Pereyra, P., Apr. 2005. Submillimeter-Wave Atmospheric Transmission at El Leoncito, Argentina Andes. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 53, 1528–1534.– Citado na página 28 e 29.

Otárola, A., Travouillon, T., Schock, M., Els, S., Riddle, R., Skidmore, W., Dahl, R., Naylor, D., Querel, R., 2010. “Thirty-meter telescope site testing X: precipitable water vapor”. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 122, 470–484. Citado nas páginas 26, 31, 51 e 69.

Pardo, J. R., Cernicharo, J., Serabyn, E., Dec. 2001. Atmospheric transmission at microwaves (ATM): an improved model for millimeter/submillimeter applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 49, 1683–1694 Citado nas páginas 28 e 35.

Penzias, A. A.; Burrus, C. A. Millimeter-Wavelength Radio-Astronomy Techniques. *Ann.Rev. Astron. Astrophys.*, v. 11, p. 51, 1973. Citado na página 19.

Ramaty, R., Schwartz, R.A., Enome, S., Nakajima, H.: 1994, *Astrophys. J.* **436**, 941. Citado na página 17.

Raulin, Jean-Pierre & M. White, S & R. Kundu, M & Valio, Adriana & Shibasaki, K. (1999). Multiple Components in the Millimeter Emission of a Solar Flare. *The Astrophysical Journal*. 522. 10.1086/322974. Citado na página 20.

Raulin, J.P., Makhmutov, V.S., Kaufmann, P., Pacini, A.A., Lüthi, T., Hudson, H.S., Gary, D.E.: 2004, *Solar Phys.* **223**, 181. Citado nas páginas 17 e 19

Stix, M. *The Sun - An introduction*, Springer, 2nd. Edition.2004. Citado na página 1.

Tendolini. A. “Determinação da Opacidade Atmosférica no CASLEO”. TGI UPM. São Paulo 2014. Citado nas páginas 32 e 42.

Ulich, B.L., Jan 1980. Improved correction for millimeter-wavelength atmospheric attenuation. *Astrophysical Letters* 21, 21 Citado nas páginas 27, 69 e 76.

Valio, et al., 2013. “POLarization Emission of Millimeter Activity at the Sun (POEMAS): New Circular Polarization Solar Telescope at Two Millimeter Wavelength Ranges”. v. 283, p.651-665, abr. 2013. Citado nas páginas 18 e 31 e 34 (quatro vezes).

Wedemeyer, S. et al., 2016. Solar science with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array—a new view of our sun. *Space Science Reviews*, 200(1), pp. 1-73. Citado nas páginas 18 e 19

White, S. M. and Kundu, M.R. Solar Observations with a Millimeter-Wavelength Array. *Solar Physics* vol. 141, no. 2, p. 347-369, 1992 Citado nas páginas 18, 19 e 20.

Westwater, E. R. 1978, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 13, 677. Citado na página 28.

Sites

<https://aeronet.gsfc.nasa.gov> - Vários acessos

https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3. Acessado em 11/12/2018

https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3?site=CASLEO&nachal=0&year=2013&aero_water=1&level=3&if_day=0&if_err=0&place_code=10&year_or_month=1). Acessado em 11/12/2018

https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/system_descriptions.html.

Acessado em 12/06/2019

https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/system_descriptions_instrument.html.

Acessado em 12/06/2019

<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/argentina/san-juan/san-juan-1913/> - Vários acessos.

Anexo A

MEDIDAS MENSAIS DE 2012 E 2013

Nesse anexo estão colocadas todas as medidas e estatísticas gerais que deram origem aos resultados apresentados nesse trabalho.

Os dados foram tratados através de software de estatística que produziram as tabelas que aqui seguem. Como se trata do valor da opacidade as unidades utilizadas são:

Média, Moda, Mediana, Erro padrão e Desvio padrão – Np

Variância – Np^2

Intervalo, Mínimo, Máximo e Soma – Np

Contagem – número de medidas

Assimetria e Curtose – não possuem unidades.

MEDIDAS PARA 45 GHz/2012

<i>Ano2012 45</i>		<i>jan/12</i>		<i>fev/12</i>	
Média	690,0776	Média	0,0728	Média	0,0738
Erro padrão	1,563897	Erro padrão	0,0011	Erro padrão	0,0011
Mediana	676	Mediana	0,0710	Mediana	0,0725
Modo	670	Modo	0,0637	Modo	0,0696
Desvio padrão	51,01277	Desvio padrão	0,0080	Desvio padrão	0,0067
Variância da amostra	2602,303	Variância da amostra	0,0001	Variância da amostra	0,0000
Curtose	4,324074	Curtose	-0,6467	Curtose	-0,0482
Assimetria	1,588049	Assimetria	0,6310	Assimetria	0,6503
Intervalo	498	Intervalo	0,0283	Intervalo	0,0274
Mínimo	484	Mínimo	0,0632	Mínimo	0,0634
Máximo	982	Máximo	0,0915	Máximo	0,0908
Soma	734242,6	Soma	3,9295	Soma	2,8794
Contagem	1064	Contagem	54,0000	Contagem	39,0000
<i>mai/12</i>		<i>jun/12</i>		<i>jul/12</i>	
Média	0,0679	Média	0,0676	Média	0,0675
Erro padrão	0,0004	Erro padrão	0,0005	Erro padrão	0,0003
Mediana	0,0670	Mediana	0,0663	Mediana	0,0669
Modo	0,0668	Modo	0,0663	Modo	0,0679
Desvio padrão	0,0045	Desvio padrão	0,0046	Desvio padrão	0,0027
Variância da amostra	2,04E-05	Variância da amostra	2,16E-05	Variância da amostra	7,47E-06
Curtose	15,44906	Curtose	3,041212	Curtose	7,438418
Assimetria	2,291964	Assimetria	-0,03917	Assimetria	2,271724
Intervalo	0,0443	Intervalo	0,0300	Intervalo	0,0182
Mínimo	0,0515	Mínimo	0,0484	Mínimo	0,0632
Máximo	0,0958	Máximo	0,0784	Máximo	0,0814
Soma	6,9226	Soma	5,4741	Soma	6,6871
Contagem	102	Contagem	81	Contagem	99

<i>mar/12</i>		<i>abr/12</i>		<i>ago/12</i>	
Média	0,0722	Média	0,070606	Média	0,0686
Erro padrão	0,0006	Erro padrão	0,000545	Erro padrão	0,0003
Mediana	0,0713	Mediana	0,0696	Mediana	0,0681
Modo	0,0662	Modo	0,0662	Modo	0,0681
Desvio padrão	0,0060	Desvio padrão	0,005258	Desvio padrão	0,0032
Variância da amostra	0,0000	Variância da amostra	2,76E-05	Variância da amostra	1,05E-05
Curtose	-0,5976	Curtose	7,372526	Curtose	5,605529
Assimetria	0,5876	Assimetria	2,020532	Assimetria	2,05486
Intervalo	0,0246	Intervalo	0,0346	Intervalo	0,0195
Mínimo	0,0641	Mínimo	0,0636	Mínimo	0,0640
Máximo	0,0887	Máximo	0,0982	Máximo	0,0835
Soma	7,3593	Soma	6,5664	Soma	7,2748
Contagem	102,0000	Contagem	93	Contagem	106
<i>set/12</i>		<i>out/12</i>		<i>nov/12</i>	
Média	0,0678	Média	0,0669	Média	0,0701
Erro padrão	0,0004	Erro padrão	0,0003	Erro padrão	0,0005
Mediana	0,0670	Mediana	0,0660	Mediana	0,0691
Modo	0,0670	Modo	0,0656	Modo	0,0677
Desvio padrão	0,0036	Desvio padrão	0,0032	Desvio padrão	0,0053
Variância da amostra	1,31E-05	Variância da amostra	1,03E-05	Variância da amostra	2,85E-05
Curtose	2,895247	Curtose	1,576615	Curtose	6,84211
Assimetria	1,350344	Assimetria	1,33563	Assimetria	1,846833
Intervalo	0,0205	Intervalo	0,0144	Intervalo	0,0353
Mínimo	0,0619	Mínimo	0,0627	Mínimo	0,0627
Máximo	0,0824	Máximo	0,0771	Máximo	0,0980
Soma	7,12	Soma	5,9535	Soma	6,7305
Contagem	105	Contagem	89	Contagem	96

<i>dez/12</i>							
Média	0,0675						
Erro padrão	0,0003						
Mediana	0,0662						
Modo	0,0655						
Desvio padrão	0,0034						
Variância da amostra	1,17E-05						
Curtose	3,524838						
Assimetria	1,492089						
Intervalo	0,0202						
Mínimo	0,0632						
Máximo	0,0834						
Soma	6,6819						
Contagem	99						

MEDIDAS DE 90 GHz/2012

<i>Ano 2012 90</i>		<i>jan/12</i>		<i>fev/12</i>	
Média	600,4512	Média	0,0530	Média	0,1155
Erro padrão	4,919654	Erro padrão	0,0054	Erro padrão	0,0411
Mediana	596	Mediana	0,0465	Mediana	0,0747
Modo	681	Modo	#N/D	Modo	#N/D
Desvio padrão	133,2854	Desvio padrão	0,0143	Desvio padrão	0,1591
Variância	17765	Variância	0,0002	Variância	0,0253
Curtose	1,761478	Curtose	3,1171	Curtose	14,6208
Assimetria	0,808172	Assimetria	1,8723	Assimetria	3,8053
Intervalo	1093	Intervalo	0,0392	Intervalo	0,6436
Mínimo	101	Mínimo	0,0432	Mínimo	0,0441
Máximo	1194	Máximo	0,0824	Máximo	0,6877
Soma	440731,2	Soma	0,3712	Soma	1,7331
Contagem	734	Contagem	7,0000	Contagem	15,0000
<i>mai/12</i>		<i>jun/12</i>		<i>jul/12</i>	
Média	0,0529	Média	0,0574	Média	0,0518
Erro padrão	0,0008	Erro padrão	0,0021	Erro padrão	0,0011
Mediana	0,0527	Mediana	0,0526	Mediana	0,0486
Modo	0,0427	Modo	0,0542	Modo	0,0485
Desvio padrão	0,0067	Desvio padrão	0,0149	Desvio padrão	0,0095
Variância	4,44E-05	Variância	0,000222	Variância	9,05E-05
Curtose	-0,17126	Curtose	0,289837	Curtose	10,61973
Assimetria	0,243299	Assimetria	1,041663	Assimetria	2,885937
Intervalo	0,0305	Intervalo	0,0607	Intervalo	0,0583
Mínimo	0,0401	Mínimo	0,0340	Mínimo	0,0409
Máximo	0,0706	Máximo	0,0947	Máximo	0,0992
Soma	4,1272	Soma	2,9826	Soma	3,6813
Contagem	78	Contagem	52	Contagem	71

<i>mar/12</i>		<i>abr/12</i>		<i>ago/12</i>	
Média	0,0703	Média	0,062829	Média	0,0546
Erro padrão	0,0025	Erro padrão	0,00249	Erro padrão	0,0011
Mediana	0,0638	Mediana	0,0596	Mediana	0,0525
Modo	0,0564	Modo	0,0563	Modo	0,0490
Desvio padrão	0,0195	Desvio padrão	0,017429	Desvio padrão	0,0100
Variância	0,0004	Variância	0,000304	Variância	0,0001
Curtose	0,8455	Curtose	-0,23051	Curtose	2,116974
Assimetria	0,3037	Assimetria	0,709481	Assimetria	1,140582
Intervalo	0,1073	Intervalo	0,0659	Intervalo	0,0555
Mínimo	0,0101	Mínimo	0,0389	Mínimo	0,0378
Máximo	0,1174	Máximo	0,1048	Máximo	0,0933
Soma	4,3599	Soma	3,0786	Soma	4,4746
Contagem	62,0000	Contagem	49	Contagem	82
<i>set/12</i>		<i>out/12</i>		<i>nov/12</i>	
Média	0,0526	Média	0,0531	Média	0,0579
Erro padrão	0,0012	Erro padrão	0,0011	Erro padrão	0,0017
Mediana	0,0526	Mediana	0,0501	Mediana	0,0559
Modo	0,0532	Modo	0,0480	Modo	0,0582
Desvio padrão	0,0111	Desvio padrão	0,0094	Desvio padrão	0,0123
Variância	0,000123	Variância	8,82E-05	Variância	0,0002
Curtose	3,699647	Curtose	1,526642	Curtose	0,662392
Assimetria	1,252613	Assimetria	1,163255	Assimetria	0,81035
Intervalo	0,0681	Intervalo	0,0482	Intervalo	0,0590
Mínimo	0,0340	Mínimo	0,0392	Mínimo	0,0379
Máximo	0,1021	Máximo	0,0874	Máximo	0,0969
Soma	4,4196	Soma	3,8245	Soma	3,1256
Contagem	84	Contagem	72	Contagem	54
<i>dez/12</i>					
Média	0,0535				
Erro padrão	0,0013				
Mediana	0,0497				
Modo	0,0433				
Desvio padrão	0,0103				
Variância	0,000106				
Curtose	0,194933				
Assimetria	1,044443				
Intervalo	0,0422				
Mínimo	0,0415				
Máximo	0,0837				
Soma	3,5847				
Contagem	67				

MEDIDAS PARA 45 GHz – 2013

<i>jan/13</i>		<i>fev/13</i>		<i>mar/13</i>		<i>abr/13</i>	
Média	0,079	Média	0,063	Média	0,068	Média	0,066
Erro padrão	0,005	Erro padrão	0,002	Erro padrão	0,002	Erro padrão	0,000
Mediana	0,068	Mediana	0,056	Mediana	0,063	Mediana	0,066
Modo	0,068	Modo	0,073	Modo	0,067	Modo	0,064
Desvio pa	0,032	Desvio pa	0,017	Desvio pa	0,016	Desvio pa	0,003
Variância	0,001	Variância	0,000	Variância	0,000	Variância	0,000
Curtose	1,517	Curtose	-0,077	Curtose	0,905	Curtose	8,740
Assimetria	1,481	Assimetria	0,738	Assimetria	0,967	Assimetria	2,195
Intervalo	0,123	Intervalo	0,070	Intervalo	0,080	Intervalo	0,018
Mínimo	0,048	Mínimo	0,041	Mínimo	0,041	Mínimo	0,062
Máximo	0,171	Máximo	0,111	Máximo	0,121	Máximo	0,081
Soma	3,408	Soma	2,973	Soma	5,403	Soma	6,100
Contagem	43,000	Contagem	47,000	Contagem	80,000	Contagem	92,000
Nível de c	0,010	Nível de c	0,005	Nível de c	0,004	Nível de c	0,001
<i>mai/13</i>		<i>Julho/203</i>		<i>ago/13</i>			
Média	0,068	Média	0,067	Média	0,067		
Erro padrão	0,000	Erro padrão	0,000	Erro padrão	0,000		
Mediana	0,067	Mediana	0,067	Mediana	0,067		
Modo	0,067	Modo	0,068	Modo	0,068		
Desvio pa	0,003	Desvio pa	0,003	Desvio pa	0,003		
Variância	0,000	Variância	0,000	Variância	0,000		
Curtose	3,803	Curtose	1,501	Curtose	2,692		
Assimetria	1,763	Assimetria	0,950	Assimetria	1,405		
Intervalo	0,014	Intervalo	0,015	Intervalo	0,017		
Mínimo	0,065	Mínimo	0,061	Mínimo	0,062		
Máximo	0,079	Máximo	0,076	Máximo	0,080		
Soma	6,036	Soma	5,710	Soma	6,722		
Contagem	89,000	Contagem	85,000	Contagem	100,000		
Nível de c	0,001	Nível de c	0,001	Nível de c	0,001		
<i>set/13</i>		<i>out/13</i>		<i>nov/13</i>		<i>dez/13</i>	
Média	0,049	Média	0,069	Média	0,067	Média	0,068
Erro padrão	0,001	Erro padrão	0,000	Erro padrão	0,000	Erro padrão	0,001
Mediana	0,047	Mediana	0,068	Mediana	0,066	Mediana	0,066
Modo	0,045	Modo	0,068	Modo	0,065	Modo	0,066
Desvio pa	0,006	Desvio pa	0,005	Desvio pa	0,004	Desvio pa	0,004
Variância	0,000	Variância	0,000	Variância	0,000	Variância	0,000
Curtose	1,130	Curtose	11,398	Curtose	0,182	Curtose	7,405
Assimetria	1,371	Assimetria	2,517	Assimetria	1,044	Assimetria	2,454
Intervalo	0,022	Intervalo	0,038	Intervalo	0,016	Intervalo	0,020
Mínimo	0,042	Mínimo	0,061	Mínimo	0,062	Mínimo	0,064
Máximo	0,064	Máximo	0,098	Máximo	0,078	Máximo	0,084
Soma	1,713	Soma	7,019	Soma	4,768	Soma	1,629
Contagem	35,000	Contagem	102,000	Contagem	71,000	Contagem	24,000
Nível de c	0,002	Nível de c	0,001	Nível de c	0,001	Nível de c	0,002

MEDIDAS PARA 90 GHZ - 2013

<i>jan/13</i>		<i>fev/13</i>		<i>mar/13</i>		<i>abr/13</i>	
Média	0,079	Média	0,063	Média	0,068	Média	0,054
Erro padrão	0,005	Erro padrão	0,002	Erro padrão	0,002	Erro padrão	0,001
Mediana	0,068	Mediana	0,056	Mediana	0,063	Mediana	0,054
Modo	0,068	Modo	0,073	Modo	0,067	Modo	0,047
Desvio padrão	0,032	Desvio padrão	0,017	Desvio padrão	0,016	Desvio padrão	0,008
Variância	0,001	Variância	0,000	Variância	0,000	Variância	0,000
Curtose	1,517	Curtose	-0,077	Curtose	0,905	Curtose	-1,165
Assimetria	1,481	Assimetria	0,738	Assimetria	0,967	Assimetria	0,169
Intervalo	0,123	Intervalo	0,070	Intervalo	0,080	Intervalo	0,029
Mínimo	0,048	Mínimo	0,041	Mínimo	0,041	Mínimo	0,040
Máximo	0,171	Máximo	0,111	Máximo	0,121	Máximo	0,069
Soma	3,408	Soma	2,973	Soma	5,403	Soma	3,676
Contagem	43,000	Contagem	47,000	Contagem	80,000	Contagem	68,000
Nível de c	0,010	Nível de c	0,005	Nível de c	0,004	Nível de c	0,002
<i>mai/13</i>		<i>jun/13</i>		<i>jul/13</i>		<i>ago/13</i>	
Média	0,051	Média	0,055	Média	0,049	Média	0,050
Erro padrão	0,001						
Mediana	0,051	Mediana	0,053	Mediana	0,046	Mediana	0,050
Modo	0,048	Modo	0,069	Modo	0,046	Modo	0,045
Desvio padrão	0,006	Desvio padrão	0,011	Desvio padrão	0,009	Desvio padrão	0,008
Variância	0,000	Variância	0,000	Variância	0,000	Variância	0,000
Curtose	4,422	Curtose	-0,463	Curtose	2,384	Curtose	1,523
Assimetria	1,676	Assimetria	0,544	Assimetria	1,464	Assimetria	1,108
Intervalo	0,031	Intervalo	0,041	Intervalo	0,044	Intervalo	0,036
Mínimo	0,043	Mínimo	0,039	Mínimo	0,036	Mínimo	0,040
Máximo	0,074	Máximo	0,080	Máximo	0,079	Máximo	0,076
Soma	2,678	Soma	2,842	Soma	2,705	Soma	2,722
Contagem	52,000	Contagem	52,000	Contagem	55,000	Contagem	54,000
Nível de c	0,002	Nível de c	0,003	Nível de c	0,002	Nível de c	0,002
<i>set/13</i>		<i>out/13</i>		<i>nov/13</i>		<i>dez/13</i>	
Média	0,049	Média	0,056	Média	0,055	Média	0,059
Erro padrão	0,001	Erro padrão	0,002	Erro padrão	0,002	Erro padrão	0,006
Mediana	0,047	Mediana	0,051	Mediana	0,049	Mediana	0,053
Modo	0,045	Modo	0,049	Modo	0,048	Modo	#N/D
Desvio padrão	0,006	Desvio padrão	0,016	Desvio padrão	0,015	Desvio padrão	0,020
Variância	0,000	Variância	0,000	Variância	0,000	Variância	0,000
Curtose	1,130	Curtose	1,629	Curtose	-0,065	Curtose	3,507
Assimetria	1,371	Assimetria	1,413	Assimetria	0,892	Assimetria	1,821
Intervalo	0,022	Intervalo	0,072	Intervalo	0,058	Intervalo	0,067
Mínimo	0,042	Mínimo	0,035	Mínimo	0,037	Mínimo	0,042
Máximo	0,064	Máximo	0,107	Máximo	0,096	Máximo	0,109
Soma	1,713	Soma	2,705	Soma	4,229	Soma	0,645
Contagem	35,000	Contagem	48,000	Contagem	77,000	Contagem	11,000
Nível de c	0,002	Nível de c	0,005	Nível de c	0,003	Nível de c	0,013