INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Estudo do balanço de gases estufa na bacia amazônica utilizando medidas de coluna total por meio da técnica de FTIR

CARLOS AUGUSTO BAUER AQUINO

Tese apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Doutor em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientador:
Prof. Dr. José Oscar William Vega Bustillos

SÃO PAULO

2023

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Estudo do balanço de gases estufa na bacia amazônica utilizando medidas de coluna total por meio da técnica de FTIR

Versão corrigida
Versão Original disponível no IPEN

CARLOS AUGUSTO BAUER AQUINO

Tese apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Doutor em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientador:
Prof. Dr. José Oscar William Vega Bustillos

SÃO PAULO
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

BAUER AQUINO, C. A. ***Estudo do balanço de gases estufa na bacia amazônica utilizando medidas de coluna total por meio da técnica de FTIR***. 2023. 93 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: ‹http://repositorio.ipen.br/› (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bauer Aquino, Carlos Augusto
Estudo do balanço de gases estufa na bacia amazônica utilizando medidas de coluna total por meio da técnica de FTIR / Carlos Augusto Bauer Aquino; orientador José Oscar William Vega Bustillos. -- São Paulo, 2023.
93 f.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.

1. clima. 2. Bacia Amazônica. 3. gases de efeito estufa. 4. aprendizado de máquina. I. Vega Bustillos, José Oscar William , orient. II. Título.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA NUCLEAR DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESTUDO DO BALANÇO DE GASES ESTUFA NA BACIA AMAZÔNICA UTILIZANDO MEDIDAS DE COLUNA TOTAL POR MEIO DA TÉCNICA DE FTIR

CARLOS AUGUSTO BAUER AQUINO

SÃO PAULO
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

AQUINO, Carlos A. B. ***Estudo do balanço de gases estufa na Bacia Amazônica utilizando medidas de coluna total por meio da técnica FTIR.*** 2023. 94 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese a todas as pessoas que de um modo ou de outro contribuíram para a sua realização. Principalmente à minha família: esposa Patrícia e filhas Maria Eduarda e Maria Fernanda. Muito obrigado! Este trabalho não existiria sem vocês. Amo vocês.

Aos meus pais Aristeli Ferreira Aquino (em memória) e Clélia Bauer Aquino, pela educação, amor, honestidade e perseverança, modelos a serem seguidos, e pelo incentivo ao estudo, pois só ele nos leva ao futuro. E obrigado ao meu irmão Douglas Bauer Aquino pela paciência e compreensão em todos os momentos que se fez necessário.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jose Oscar Veja Bustillos pela paciência, dedicação e confiança em mim depositada para que este trabalho fosse concluído. Suas palavras sempre foram muito importantes.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia – IFRO, a oportunidade do convênio realizado entre IPEN e IFRO que nos proporcionou a realização deste trabalho. E também aos colegas de trabalho, tanto da reitoria, quanto do campus.

Ao Instituto Aeroespacial da Bélgica (Belgian Institute for Space Aeronomy – BIRA-IASB), a Dra. Martine D'Maziere, a Dra. Corinne Vigouroux, ao Dr. Christian Hermans, ao Dr. Francis Scolas, Minqiang Zhou e Dr. Nicolas Kumps, obrigado pela paciência e pelo carinho durante essa jornada, além dos ensinamentos.

Aos amigos que incentivaram e contribuíram para essa realização, Christiane Silvestrini de Morais, Kaio Alexandre Silva, Rodrigo Brasil, Juliete Fadoul Blanc E Êrica Fadoul Blanc. Vocês foram muito importantes nessa caminhada e, tantos outros que contribuíram de forma direta ou indireta.

Aos meus alunos colaboradores Roseclei Oliveira de Almeida, Esdras Abimael Maia Mendonça e Juliana Araújo Flores, obrigado pela ajuda e pela parceria.

Agradeço a atenção e dedicação das funcionárias do departamento do ensino do IPEN, Bruna e Paula, que mesmo eu estando do outro lado do país, me auxiliaram sempre que precisei, e ao Fernando Moreira. Vocês também foram fundamentais nessa caminhada.

RESUMO

AQUINO, Carlos A. B. **Estudo do balanço de gases estufa na Bacia Amazônica utilizando medidas de coluna total por meio da técnica de FTIR.** 2023. 93 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo

A intervenção humana no ciclo do carbono vem provocando alterações nos ciclos biogeoquímicos. Um dos efeitos mais significativos é o efeito estufa que está provocando um aumento da temperatura média do planeta. O presente trabalho, tem como objetivo a caracterização química dos gases da atmosfera, considerados Gases de Efeito Estufa (CH_4, N_2O) e Compostos Orgânicos Voláteis (C_2H_2, C_2H_6, H_2CO e HCN) e o CO, (traçador de queimadas) que podem interferir no clima e no ecossistema da Bacia Amazônica, e correlacioná-las com fatores climáticos: previsão de chuva e chuva efetiva. A concentração dos gases: foi medida aplicando a técnica da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier – FTIR, utilizando um espectrômetro de absorção Bruker 125M FTIR, num período de 4 anos por meio de medidas de perfil vertical em Porto Velho (8,8°S, 63,9°O), Rondônia. Local privilegiado pela sua posição na América do Sul e por ser caminho das massas de ar que transportam humidade para diversas regiões do Brasil. Para obtenção dos dados climáticos desenvolveu-se um sistema (software) utilizando a metodologia de desenvolvimento por prototipação (Robô de banco de dados). A análise dos dados, obtidos pelos diferentes equipamentos, utilizou um processo que combina diversas áreas de descoberta do conhecimento: Aprendizagem de Máquina, Reconhecimento de Padrões, Estatística e Inteligência Artificial. Com os resultados encontrados, observamos que a concentração dos gases, possuem relação com a movimentação atmosférica relativa às altitudes estudadas (troposfera). Os valores de acurácia encontrados nas análises, são considerados promissores para uma nova metodologia de análise e estudos climáticos. Ressalta-se a necessidade da continuidade e aprofundamento dos estudos, aplicando a metodologia criada, aperfeiçoando as análises e utilizando dados recentes, considerando que este método pode contribuir para as previsões climáticas da região.

Palavras-chave: clima. Bacia Amazônica. gases de efeito estufa. aprendizado de máquina.

ABSTRACT

AQUINO, Carlos A. B. **STUDY OF THE GREENHOUSE GAS BALANCE IN THE AMAZONIC BASIN USING TOTAL COLUMN MEASURES THROUGH THE FTIR TECHNIQUE.** 2023. 93 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo

Human intervention in the carbon cycle has been causing changes in biogeochemical cycles. One of the most significant effects is the greenhouse effect, which is causing an increase in the planet's average temperature. This work aims at the chemical depiction of atmospheric gases, considered Greenhouse Gases (CH_4, N_2O) and Volatile Organic Compounds (C_2H_2, C_2H_6, H_2CO and HCN) and the CO, (burnings tracer) which may interfere on the climate and the ecosystem of Amazon Basin, and associate them with some climatic factors: rainfall forecast and effective rainfall. Gases concentration: reasoned by applying the Fourier Transform Infrared Spectroscopy Technique – FTIR, using a Bruker 125M FTIR absorption spectrometer, for over a period of 4 years by means of vertical profile measurements in Porto Velho (8.8° S, 63.9°C), Rondonia. A privileged site for its position in South America and for being the pathway of the air masses that drive humidity to different regions of Brazil. In order to reach climate info a system (software) has been conceived, by using the prototyping development methodology (database robot). The analysis of the data obtained by different equipment, used a process that combines several areas of knowledge discovery: Machine Learning, Pattern Recognition, Statistics and Artificial Intelligence. By the results obtained, we noticed that the concentration of gases related to the atmospheric movement relative to the considered altitudes (troposphere). The accuracy values found in the analysis are promising for a new methodology of analysis and climate studies. It emphasizes the need for continuity and deepening of studies, applying the methodology, enhancing the analysis and using recent data, taking into consideration that this method can contribute to climate forecasts in the region.

Keywords: climate. Amazon Basin. greenhouse gases. machine learning.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Apresenta o resumo das contribuições para o aumento do efeito estufa e suas fontes antropogênicas..... **18**

Tabela 2 – Distribuição de grupos moleculares dentro do espectro..... **39**

Tabela 3 – Distribuição das subdivisões do infravermelho..... **39**

Tabela 4 – Resultados do teste de comparação, para previsão e chuva efetiva para o período de 28 de agosto a 03 de setembro para os anos de 2020 e 2016 em Porto Velho – RO..... **74**

Tabela 5 – Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (1), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, CO e N_2O e as variáveis climáticas em análise com 90 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre7 e 16 km..... **76**

Tabela 6 – Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (1), composta pelas concentrações dos gases: C_2H_2, C_2H_6, H_2CO e HCN e as variáveis climáticas em análise com 90 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km..... **76**

Tabela 7 – Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (1), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, N_2O, C_2CO e C_2H_6 e as variáveis climáticas em análise com 90 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km..... **76**

Tabela 8 – Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (2), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, CO e N_2O e as variáveis climáticas em análise com 60 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km..... **77**

Tabela 9 – Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (2), composta pelas concentrações dos gases: C_2H_2, C_2H_6, H_2CO e HCN e as variáveis climáticas em análise com 60 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km..... **77**

Tabela 10 – Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (2), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, N_2O, C_2CO e C_2H_6 e as variáveis climáticas em análise com 60 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km..... **78**

Tabela 11 – Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (3), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, CO e N_2O e as variáveis climáticas em análise com 30 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre7 e 16 km..... **78**

Tabela 12 – Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (2), composta pelas concentrações dos gases: C_2H_2, C_2H_6, H_2CO e HCN e as variáveis climáticas em análise com 30 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km..... **79**

Tabela 13 – Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (2), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, N_2O, C_2CO e C_2H_6 e as variáveis climáticas em análise com 30 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km **79**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço radiativo sem a presença de gases de efeito estufa (esquerda) e com gases de efeito estufa na atmosfera (direita) **17**

Figura 2 – Caminho da Zona de Convecção do Atlântico Sul a partir da entrada das massas de ar no Continente..... **20**

Figura 3 – Newton estudando a refração da Luz..... **24**

Figura 4 – Espectro de transmissão da atmosfera terrestre, nas faixas do infravermelho próximo, médio e distante..... **27**

Figura 5 – Espectrômetro Bruker 125M FTIR, de alta resolução instalado no Campus Porto Velho Calama do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia..... **29**

Figura 6 – Rede para a detecção de mudança de composição atmosférica: BIRA – IASB..... **30**

Figura 7 – Estados que compõem a Amazônia Legal **32**

Figura 8 – Focos de queimadas na Amazônia Legal e no Bioma Amazônico..... **33**

Figura 9 – Caminho dos rios voadores a partir da entrada das massas de ar no Continente..... **35**

Figura 10 – Coletas em loco versus sensoriamento remoto..... **36**

Figura 11 – Tipos de movimento realizados por moléculas conforme seu estado de agitação..... **38**

Figura 12 – Esquema básico de espectroscopia, que utiliza o Sol como fonte de Radiação..... **40**

Figura 13 – Espectrômetro Bruker IFS 125M FTIR..... **41**

Figura 14 – Rastreador solar utilizado pelo espectrômetro Bruker IFS 125 M..... **42**

Figura 15 – Ângulos Azimutal e Zenital da movimentação solar..... **43**

Figura 16 – Fenômenos de difração e interferência. Cálculos básicos de posições das interferências..... **44**

Figura 17 – Funcionamento do interferômetro de Michelson controlado por computador **45**

Figura 18 – Detector similar ao utilizado pelo Espectrômetro Bruker 125M FTIR..... **47**

Figura 19 – Interferograma..... **49**

Figura 20 – Caminho óptico completo no interferômetro do Espectrômetro Bruker IFS 125M..... **50**

Figura 21 – Bruker 125 FTIR Espectrômetro De Alta Resolução Em FTIR Instalado no Campus Porto Velho Calama – Porto Velho / RO..... **52**

Figura 22 – Princípio de funcionamento do Interferômetro de Michelson..... **52**

Figura 23 – Detalhamento do caminho da luz do sol na abertura do Espectrômetro FTIR..... **53**

Figura 24 – *Solar Tracker* – Instalado No Campus Porto Velho Calama –Porto Velho / RO..... **53**

Figura 25 – Estação Meteorológica – Instalada no Campus Porto Velho Calama – Porto Velho / RO..... **54**

Figura 26 – a (esquerda) Espectro medido em Porto Velho no dia 18 de agosto 2016. b (direita): exemplo das linhas de absorção do CO_2 que podem ser utilizadas na quantificação..... **55**

Figura 27 – Espectro de transmissão da atmosfera terrestre. Corresponde a uma camada de 1830 m de ar ao nível do mar e com 40% de umidade relativa a 25ºC. Na parte de baixo da Figura estão indicadas as linhas de absorção de alguns componentes do ar atmosférico. É importante ressaltar que a Figura refere-se à uma camada de ar de quase 2km..... **55**

Figura 28 – Metodologia *Cross-Industry Standard Process for Data Mining*, adaptado para o processo de análise dos dados produzidos pelos diferentes equipamentos aplicados nesta pesquisa..... **57**

Figura 29 – Modelo de prototipação..... **60**

Figura 30 – Os resultados obtidos pelo Robô de busca de dados de previsão de chuva para a cidade de Porto Velho Rondônia - 2020..... **61**

Figura 31 – O quadro apresenta o organograma que descreve do tratamento, preparação e análise das variáveis estudadas..... **66**

Figura 32 – Representação entre FAR versus FRR e intersecção para identificar a precisão do sistema CER..... **67**

Figura 33 – Série temporal das concentrações de CH_4 no período de julho de 2016 a julho de 2017 realizadas pelo Bruker 125M FTIR..... **70**

Figura 34 – Série temporal das concentrações de xCO no período de 2016 a 2017 medidas por coluna total de FTIR..... **71**

Figura 35 – Concentrações de CO nos meses de agosto, setembro e outubro de 2016 em Porto Velho/RO, utilizando o Bruker 125M FTIR..... **72**

Figura 36 – Série temporal total da coluna de HCHO, C_2H_6, HCN e C_2H_2 em Porto Velho para o período de julho de 2016 a julho de 2017, a partir de dados FTIR. As barras de erro correspondem aqui apenas às

incertezas aleatórias, para destacar a precisão de nossas medições..... **72**

Figura 37 – Correlação entre dados de Previsão de Chuva e Chuva Efetiva, entre os dias 28 de agosto a 03 de setembro de 2020 em Porto Velho – RO..... **74**

Figura 38 – Concentrações de CO na altitude de 7km e Precipitação de chuva nos meses de agosto e setembro de 2016 – Porto Velho Rondônia..... **80**

Figura 39 – Concentrações de CH_4 na altitude de 7km e Precipitação de chuva nos meses de agosto e setembro de 2016 – Porto Velho Rondônia... **81**

Figura 40 – Espectrômetro Bruker IFS 125HR FTIR, de alta resolução instalado no Campus Porto Velho Calama do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia..... **82**

LISTA DE ABREVIATURAS

CO_2	–	Dióxido de Carbono
H_2O	–	Água
CH_4	–	Metano
N_2O	–	Óxido Nitroso
O_3	–	Ozônio
CFC	–	Clorofluorcarbono
GEE	–	Gases de Efeito Estufa
LBA	–	Experimento de Larga Escala da Biosfera – Atmosfera da Amazônia
ZCAS	–	Zona de Convecção do Atlântico Sul
NCN	–	Núcleos de Condensação de Nuvens
FTIR	–	Fourier – Transform Infrared (Infravermelho por Transformada de Fourier)
SWIR	–	Short Wavelength Infrared
MWIR	–	Middle Wavelength Infrared
LWIR	–	Long Wavelength Infrared
NIR	–	Near Infrared
MIR	–	Middle Infrared
FIR	–	Far Infrared
NDACC	–	Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (Detecção de Alteração da Composição Atmosférica)
TCCON	–	Total Carbon Column Network
COVs	–	Compostos Orgânicos Voláteis
IR	–	Radiação Infravermelho
BIRA – IASB	–	Belgian Institute for Space Aeronomy
C_2H_2	–	Acetileno
C_2H_6	–	Etanol
H_2CO	–	Formaldeído
HCN	–	Ácido Cianídrico
CO	–	Monóxido de Carbono
O_3	–	Ozônio
UV	–	Ultravioleta

DTGS	–	Tri-Glycine Sulphate Deuterated (Triglicina Deuterada)
$LiTaO_3$	–	Lithium Tantalate (Tantalato de Lítio)
PTZ	–	Lead Zinc Titanete (Titanato de Zinco e Chumbo)
MCT	–	Telureto de Cádmio e Mercúrio
DTGS	–	Triglicina Deuterada
GelKBr	–	Brometo de Potássio recoberto em Germânio
BELSPO	–	Belgian Science Policy Office
IPEN	–	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IFRO	–	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia
DOFS	–	Degrees of Freedom for Signal
KDD	–	Knowledge Discovery in Database
DCBD	–	Descoberta de Conhecimento em Base de Dados
CRISP-DM	–	Cross – Industry Standard Process for Data
INMET	–	Instituto Nacional de Meteorologia
TRMM	–	Tropical Rainfall Measuring
GPM	–	Global Precipitation Measurement
JAXA	–	Japonesa de Exploração Espacial
IMERG	–	Integrated Multi-satellite Retrivals
PMW	–	Passive Microwave
CHIRPS	–	Hazards Group Infrared Precipitation with Station data
CCD	–	Cold Cloud Duration
LR	–	Regressão Logística
SVM	–	Support Vector Machine
NB	–	Naive-Bayes
ETL	–	Extract Transform Load
FAR	–	False Acceptance Rate
FRR	–	False Rejection Rate
ERR	–	Equal Error Rate
CER	–	Crossover Error Rate
OCS	–	Sulfeto de Carbonila

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 Ciclo biogeoquímico do carbono 22

1.2 A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier – FTIR..... 23

1.3 Monitoramento atmosférico via FTIR 28

1.4 As medidas dos gases de efeito estufa GEE no Hemisfério Sul..... 29

2 OBJETIVOS..... 31

2.1 Objetivo geral..... 31

2.2 Objetivos específicos..... 31

3 REVISÃO DE LITERATURA..... 31

3.1 Amazônia e bioma amazônico..... 32

3.2 Sistema climático amazônico – Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)..... 34

3.3 Ferramentas de observação e coleta de da atmosféricos 36

3.4 Espectroscopia..... 37

3.4.1 Espectroscopia no Infravermelho**..... 39**

3.4.2 Espectrômetro Bruker 125M FTIR**..... 41**

3.4.3 Rastreador solar (*Suntracker*)**..... 42**

3.4.4 Interferômetro**..... 43**

3.4.5 Detector**..... 46**

3.4.6 Transformada de Fourier**..... 48**

4 METODOLOGIA DE PESQUISA..... 50

4.1 Amostragem..... 50

4.2 Análise dos dados..... 57

4.3 Desenvolvimento do Robô e banco de dados..... 58

4.4 Satélites TRMM, GPM e CHIRPS..... 61

4.5 Construção dos Algoritmos para análise dos dados..... 63

5 RESULTADOS..... 68

5.1 Concentração dos gases medidos no FTIR..... 68

5.2 Análise de variáveis climáticas..... 73

5.3 Relação entre as variáveis climáticas e as concentrações dos gases estudados..... 75

5.4 Ineditismo da Tese 81

6 CONCLUSÃO..... 83

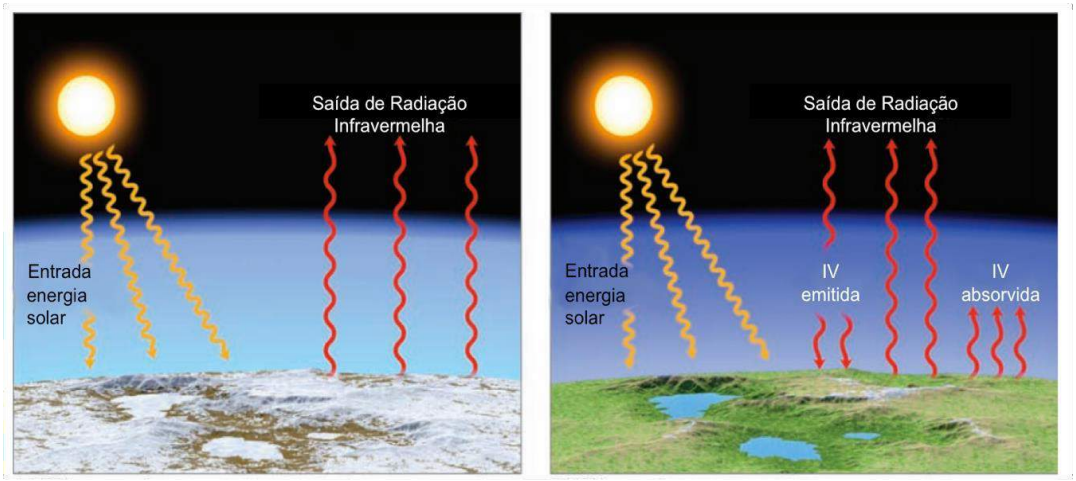
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 86

1 INTRODUÇÃO

A intervenção da humanidade no ciclo do carbono global vem ocorrendo a milhares de anos. A relação homem/natureza mudou significativamente com a Revolução Industrial. A ação do homem tem sido mais intensa e vem alterando os ciclos biogeoquímicos do planeta (MALHI Y. et al 2002). Há uma preocupação de que, ao final deste século, as atividades antrópicas terão alterado as condições básicas da vida sobre a Terra.

Estudos apontam que os ciclos naturais, que ocorreram por milhões de anos, alteraram o clima da Terra provocando: aquecimento e resfriamento. Grandes atividades geológicas lançaram na atmosfera gases capazes de absorver calor (energia), criando um efeito de aquecimento natural que conhecemos por Efeito Estufa (IPCC, 2014), com uma temperatura média de 15ºC. A Figura 1, apresenta o balanço radiativo caso não existisse o efeito estufa, a temperatura da Terra seria em torno de – 18ºC, isto é, 33°C a menos (AHRENS *et al*., 2012).

Figura 1 - Balanço radiativo sem a presença de gases de efeito estufa (esquerda) e com gases de efeito estufa na atmosfera terrestre (direita).



Fonte: adaptado Ahrens, 2012.

Os gases existentes na atmosfera que têm propriedade de absorver a radiação (calor) emitida pela Terra e que causam efeito estufa: o dióxido de carbono (CO_2), o vapor de água (H_2O), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o ozônio (O_3), o clorofluorcarbono (CFC), entre outros. Impedindo assim, que a radiação da

superfície regresse ao espaço, mantendo a troposfera aquecida e fazendo com que a temperatura média global aumente (BECK *et al*., 2012).

BARBOSA (2014) fez um estudo sobre o vapor d'água na atmosfera e apresenta uma relação da eficiência no transporte vertical de energia na troposfera, com a mudança do perfil de temperatura envolvendo a formação de nuvens. E assim, identificamos a importância do vapor d'água, com concentrações que variam de 0 a 0,04% do volume total dos componentes encontrados na atmosfera. Sendo um importante gás natural, havendo um aumento na evaporação da água, e por consequência, um aumento de sua participação no acréscimo do efeito estufa.

A Tabela 1 apresenta um resumo das contribuições do CO_2, CH_4 e N_2O, Gases do Efeito Estufa (GEE), para o aumento do efeito estufa e suas principais fontes de emissão.

Tabela 1 - Apresenta o resumo das contribuições GEE para o aumento do efeito estufa e suas fontes antrópicas.

	Aumento da Concentração desde 1750 (%)	Contribuição para o aquecimento global (%)	Principais fontes de emissão
CO_2	31	60	Uso de combustível fóssil, desflorestamento e alteração dos usos do solo
CH_4	151	20	Produção e consumo de energia (incluindo biomassa), atividades agrícolas, aterros sanitários e águas residuais
N_2O	17	6	Uso de fertilizantes, produção de ácido e queima de biomassa e combustíveis fósseis.
Halogenados (HFC, PFC e SF_6)	--	14	Industria, refrigeração, aerossóis, propulsores, espumas expandidas e solventes

Fonte: Adaptado de CETESB/PROCLIMA https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/

O clima terrestre é determinado pelo fluxo de radiação que atuam entrando e saindo do planeta. As distribuições de radiação na superfície dirigem as circulações oceânicas, mantém a evaporação da água da superfície e regem o ciclo hidrológico do planeta. Alterações no balanço de radiação da superfície, também controlam a forma como o ciclo hidrológico responde aos pequenos desequilíbrios energéticos que forçam a mudança climática (STEPHENS et al.,2012).

A radiação solar que entra no sistema terrestre e a radiação infravermelha que é emitida pela Terra podem ser alteradas pelos GEE e aerossóis, afetando o balanço de energia da Terra e o clima. Alterando a quantidade na atmosfera ou as propriedades desses gases e partículas podem levar a um aquecimento ou resfriamento do sistema climático. Este aumento da concentração é causado por emissões antrópicas, especialmente pela utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia e da mudança no uso da terra, em particular a agricultura. A mudança observada na concentração atmosférica de CO_2, CH_4 e N_2O resulta do equilíbrio dinâmico entre as emissões antropogênicas, e a perturbação dos processos naturais que levam a uma remoção parcial destes gases, a partir da atmosfera (FOSTER et al., 2007 e WALLACE et al., 2006, IPCC, 2013).

Avaliações atuais de fluxos de carbono estão sujeitas a grandes dúvidas que se propagam no balanço global de carbono. Para tentar responder às questões sobre o papel da Floresta Amazônica em relação aos GEE importantes na atmosfera como o CO_2, N_2O e o CH_4, vários estudos realizados na Amazônia, como por exemplo, o Experimento de Larga Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA), sugerem a existência de uma dinâmica particular da Floresta Amazônica, que por vezes, atua como fonte e outras como sumidouro de carbono (MCT, 2010). Em GATTI et al (2014), foi mostrado que variações climáticas afetam o balanço de carbono na Bacia Amazônica.

Pesquisas mostram uma ligação significativa entre o sistema climático amazônico e o clima em outras regiões do Brasil e América do Sul, onde o transporte de vapor de água amazônico pelas massas de ar estão relacionadas a Zona de Convecção do Atlântico Sul (ZCAS) (ROBERTSON & MECHOSO, 2000; VIEIRA, 2013 e RODRIGUES, 2012).

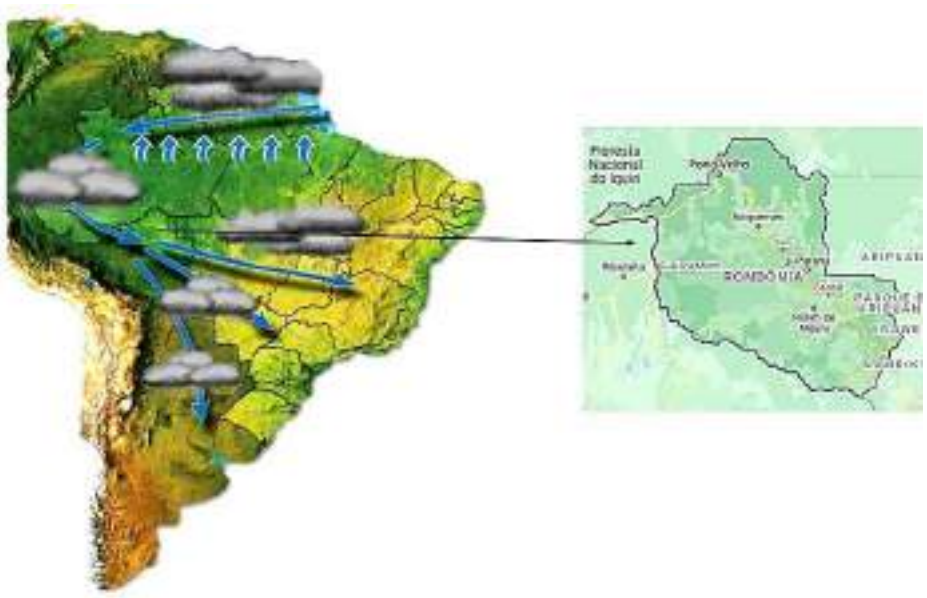
LUCAS (2007) Realizou um estudo a respeito do padrão atmosférico em baixos níveis associados às chuvas persistentes na região metropolitana de Belo Horizonte, sob uma possível influência da ZCAS. A pesquisadora identificou que os

episódios ocorreram, em sua grande maioria, no verão e que os principais padrões das chuvas estão relacionados a ZCAS, e que houve acúmulo de chuva no período, preferencialmente, nos meses de dezembro e janeiro.

Outro estudo, realizado por MARCHIORO, E., SILVA, G. M. & CORREA, W. de S. C. (2016), onde foram analisadas as influências da ZCAS sobre o comportamento das chuvas, no município de Vila Velha (ES), identificando a importância exercida pela ZCAS no comportamento do regime de chuva, que poderia desencadear ocorrências de desastres naturais na região.

Podemos citar ainda, o Projeto Rios Voadores, que buscou identificar a relação entre os sistemas climáticos da Amazônia e da Bacia do Prata, o qual tem faixas territoriais no Brasil, Argentina, Paraguai, Uruguai e Bolívia. No Brasil um ecossistema importante nessa bacia é o Pantanal (https://riosvoadores.com.br).

Figura 2 - Caminho da Zona de Convecção do Atlântico Sul a partir da entrada das massas de ar no Continente



Fonte: Adaptado de https://riosvoadores.com.br , https://earthengine.google.com

A Figura 2 mostra que o estado de Rondônia e o município de Porto Velho estão no caminho da ZCAS, que é o mesmo das massas de ar que transportam os GEE e VOCs desde a entrada no continente até a passagem pelo local onde está instalado, o espectrômetro Bruker 125M FTIR, em uma posição estratégica para

medidas desses gases. Deixando claro que durante o percurso até chegar em Porto Velho, as massas de ar recebem importantes contribuições devido aos processos de emissão e absorção dos gases ao longo de toda trajetória.

Rondônia é um estado rodeado pela floresta amazônica, uma das maiores do planeta. Esse tipo de vegetação é responsável por tornar o clima da região diferenciado. A umidade da floresta associada aos ventos soprados do litoral nordestino e a zona de convergência intertropical proporcionam estações definidas como inverno e verão, amazônicos.

A Amazônia representa em torno da metade das florestas tropicais remanescentes do planeta. Ela sofre com a ação do homem pela exploração da madeira, transformação da floresta em outras formas de exploração dos seus recursos (GATTI et al, 2010).

A destruição da floresta leva à liberação do carbono armazenado na vegetação, e, como tal, contribui para a mudança climática, além de causar um grande desequilíbrio no ciclo da água. A floresta amazônica é também uma grande fonte de emissões de queimadas que afetam outras partes do globo. De acordo com ROCHA (2019), a Amazonia possui uma relação direta e emblemática com os fenomenos de mudanças climáticas globais e, que deve mobilizar multiplas iniciativas de governança envolvendo diversos setores, publicos e privados, em prol de politicas clímaticas. ROCHA (2019), também sugere que tais preocupações podem ser mitigadas através de mecanismos de ressarcimento por serviços ambientais e dá como exemplo, entre tantos, o crédito de carbono.

Para renovação de seus recursos, o sistema Amazônico acompanha um ciclo ideal, que abrange a biodiversidade de plantas e animais com renovação da floresta e dos rios. A alteração no uso do solo, através do desmatamento e das queimadas tem alterado esse ciclo. SENA (2013), estudando o impacto de aerossóis de queimada e os efeitos das mudanças de uso do solo na Amazônia, entendeu que os impactos decorrentes das emissões de partículas de queimadas, alterações na característica da superfície (albedo) e na quantidade de vapor de água, interferem na formação de nuvens. Alterando de forma significativa um fator importante na manutenção dos índices pluviométricos.

A produção de chuva acontece por três causas diferentes: a termodinâmica da atmosfera, o vapor de água e os núcleos de condensação de nuvens (NCN) (CHAMBERS & ARTAXO – 2017).

Alterações no equilíbrio atmosférico que ocorrem em virtude do desmatamento, provocam não só a mudança na quantidade de chuva, mas também alterações na superfície do solo, deturpando o fluxo dos rios e por consequência, a evapotranspiração. ROCHA, et al (2017), avaliando os componentes do balanço de água e da reciclagem na bacia amazônica, informa que, em escala regional, a Amazônia é uma fornecedora de umidade para outras regiões do Brasil, bem como, contribui com o regime de chuva na América do Sul.

A evapotranspiração, na Amazônia, é um processo para a formação das nuvens e consequentemente, a associação de fenômenos meteorológicos indispensáveis ao ciclo hidrológico da região norte. Na bacia amazônica, a reciclagem de chuva é da ordem de 20% em média. Sendo 15% na parte norte e 40% na parte sul, assim do total de precipitação na bacia amazônica temos, aproximadamente, 20% que é um resultado, significativo do processo de evapotranspiração no balanço de água regional (ROCHA, et al, 2017).

Estudos como o de BISCARO (2019), na Amazônia as chuvas são provocadas por dois tipos de nuvens, as rasas e as profundas, convivendo na época de menor índice de poluição do ano, que é a estação chuvosa. Na estação seca onde temos a época mais poluída pela fumaça, oriundas das queimadas, no entanto raras chuvas de nuvens profundas são observadas, com muitos trovões e relâmpagos. O processo de formação das nuvens acontece por conta da condensação de partículas de água por três processos de resfriamento: por contato, no deslocamento de massas de ar sobre superfícies frias; por radiação; e pela emissão de radiação em noites de céu limpo; ou pelo processo adiabático, que é o mais comum.

O sistema climático global tem as nuvens desempenhando um papel fundamental, por meio de seus mecanismos físicos, associado aos processos dinâmicos e hidrológicos como transporte de calor, sensível e latentes, e precipitação.

1.1 Ciclo biogeoquímico do carbono

O ciclo biogeoquímico do carbono é crítico para o funcionamento do ecossistema Amazônico, e pelos efeitos climáticos globais do dióxido de carbono (CO_2), um dos mais importantes do ponto de vista de mudanças climáticas globais

(COX et al., 2000). MALHI e WRIGHT (2004) provaram que, desde meados da década de 1970, vem ocorrendo um aquecimento nas florestas tropicais de 0,26 ± 0.05 ºC, por década. Alguns cientistas sugerem pelo uso de modelos climáticos, um aquecimento entre 3 a 8 ºC para o fim do século XXI (CREMER et al, 2004). Estudos recentes mostram que a temperatura da superfície terrestre temcrescido mais do que a temperatura da superfície global, que abrange as superfícies terrestres e oceânicas, atingindo cerca de 1,53°C, enquanto a superfícieglobal teve um aumento de 0,68°C (ARNETH, et al, 2019).

Apesar do impacto significativo da floresta amazônica na atmosfera em escala global, observações da composição atmosférica sobre a floresta Amazônica ainda são insuficientes. Uma ferramenta de observação em grande escala é a utilização de satélites, pois além de abranger grandes áreas, também representam uma frequência de observações difícil de serem reproduzidas com outras técnicas de observação de grande escala. Porém suas medições precisam ser validadas com observações de alta qualidade e precisão, preferencialmente por observações terrestres remotas que, são mais comparáveis, em termos das massas de ar sondadas e as técnicas instrumentais, além de perfis verticais com aviões. O que ressalta a contribuição deste estudo na região Amazônica.

1.2 A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier - FTIR

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier - FTIR, é uma técnica utilizada desde 1940 por cientistas russos, e somente em 1950, foram comercializados os primeiros espectrômetros. Hershel, em 1800, descobre a radiação infravermelha e em 1900 Willian *Cobletz* identificou vários compostos orgânicos nas 3 respectivas fases: sólido, líquido e vapor.

Toda manifestação que nossos olhos percebem, por exemplo, é um tipo de espectroscopia que está acontecendo. Muitos outros fenômenos naturais referem-se à interação entre luz e matéria. Está claro que o arranjo molecular dos átomos para compor a forma geométrica da molécula será um componente nesse assunto, tanto para averiguar os efeitos das transições dos elétrons, como também dos núcleos dos átomos componentes da estrutura molecular (OLIVEIRA 2001).

A tentativa de compreender os efeitos que a radiação eletromagnéticaexerce sobre a matéria, provém de longa data, mas foi Isaac Newton, quem iniciou

o estudo científico das propriedades da luz. Ele foi o primeiro a desenvolver uma série de experimentos elaborados e exatos, onde ele estabelece regras matemáticas para as medidas experimentais de refração da luz (Figura 3).

Figura 3 - Newton estudando a refração da Luz

Fonte: Adaptado de http://www.quimica3d.com/ir/br/introducao.php

Um grande avanço tecnológico da espectroscopia de infravermelho, ocorreu na década de 60 com o desenvolvimento de espectrômetros utilizando o cálculo de transformada de *Fourier* como ferramenta para trabalhar os dados mensurados. O primeiro foi desenvolvido por Willian Wollaston e Joseph Von Fraunhofer, para estudar as impressões dos espectros dos elementos (MARIN, 2013).

O espectrômetro é um instrumento que tanto difunde a luz quanto a apresenta para estudo. A luz entra por uma fenda estreita e passa por uma lente que cria um feixe de raios paralelos. Esses raios passam por um prisma que desvia a luz. Cada comprimento de onda tem um desvio diferenciado. Uma segunda lente concentra luz para levá-la a um orifício de saída, permitindo que um comprimento de onda passe de cada vez (MARIN, 2013).

A espectroscopia no infravermelho é um método de caracterização físico para análises qualitativas e determinações quantitativas de elementos, isto é possível porque os átomos que formam as moléculas possuem frequências específicas de vibração, que variam de acordo com a estrutura, composição e o

modo de vibração da amostra. Para varrer esta gama de frequência utiliza-se o infravermelho (Chia, 1984).

Para ocorrer absorção da radiação infravermelha deve haver variação do momento do dipolo elétrico da molécula, por consequência de seu movimento vibracional ou rotacional. O número de vibrações, a descrição dos tipos vibracionais e suas atividades, em cada tipo, podem ser previstas a partir da simetria da molécula (SALA, 2011).

Esta técnica tem se tornado cada vez mais importante e útil na análise de materiais. Ela encontra uma extensa variedade de utilizações em laboratórios de pesquisa de todos os tipos, fornece informações úteis entre outras, no cálculo de várias constantes físicas, na determinação da estrutura de compostos, e em muitas outras áreas.

Com o avanço tecnológico dos computadores, a espectroscopia desenvolveu-se consideravelmente, tendo em vista que os equipamentos atuais, proporcionam estudos de compostos e moléculas de maneira mais rápida e refinada.

A espectroscopia estuda a influência mútua da radiação eletromagnética com a matéria, sendo um dos seus principais objetivos o estudo dos níveis de energia de átomos ou moléculas. Normalmente, as transições eletrônicas são localizadas na região do ultravioleta ou visível, as vibracionais na região do infravermelho e as rotacionais na região de micro-ondas e, em casos particulares, também na região do infravermelho longínquo (LUZ 2003).

Na molécula, o número de vibrações, a descrição dos tipos vibracionais e suas atividades, em cada tipo, podem ser antecipadas a partir da simetria da molécula.

A radiação infravermelha são ondas de comprimento de 1 mm até 700 nm, e, portanto, não visíveis para o olho humano. É uma radiação não ionizante, por isso, sem efeitos danosos. No espectro de luz, está localizado depois da luz vermelha, daí surgiu seu nome. Apesar de não poder ser vista, a radiação infravermelha pode ser notada no corpo em forma de calor.

A descoberta do infravermelho, foi por Willian Herschel, astrônomo inglês, que em 1880, estava fazendo estudos relacionados à temperatura das cores. Para tal estudo, foi usado o experimento de Newton do “espectro das cores”. Newton, em 1666, também realizou estudos relativos às cores. Uma das suas experiências

foi a de usar um prisma triangular de vidro e fazer com que a luz solar passasse por ele.

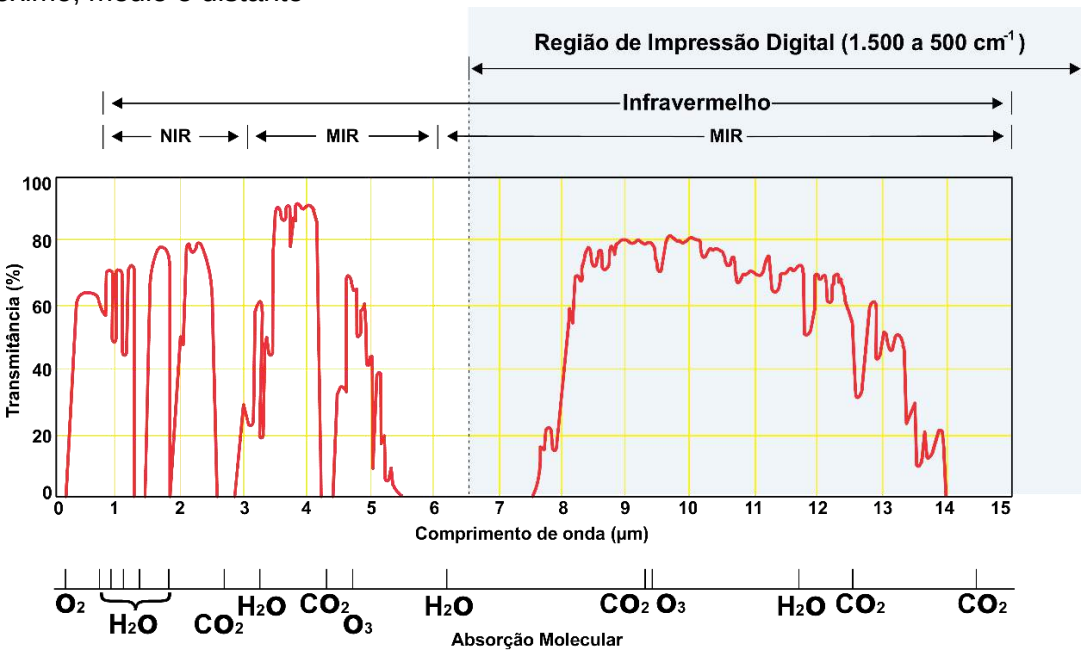
O resultado foi que, quando a luz do sol passava pelo prisma, essa luz se “dividia” em sete cores: violeta, azul anil, verde, amarelo, alaranjado e vermelho (são sete cores por haver dois tons diferentes de azul, um mais escuro, chamado anil e outro mais claro). Descobriu que a luz era formada por sete cores diferentes. Mais tarde, também por Newton, foram feitos experimentos que concluíram que a cor branca é, na verdade, a junção de todas essas cores (figura 3).

Tendo essas descobertas em mãos, Willian Herschel tentou descobrir a capacidade de cada cor em produzir calor. Para isso, usava um termômetro de mercúrio em cada uma das cores obtidas por um prisma (semelhante ao experimento de Newton). Notou-se que cada uma tinha sua porção de calor, mas que o vermelho era a que mais apresentava calor. Depois do vermelho, havia uma região sem luz, mas que conseguia produzir temperaturas maiores que o vermelho. A partir daí, descobriu que havia uma radiação, não visível, mas existente.

Desde a descoberta por Hershel, até o final dos anos 30, o desenvolvimento na região do infravermelho foi lento e voltado principalmente a sensores térmicos.

A faixa de 0,7 ou 0,75 μm até 2,5 ou 3 μm é chamada de infravermelho próximo (NIR – “*Near Infrared*”). A janela de 8 a 14 μm, também costuma ser designada por infravermelho termal, por compreender a região onde se encontra o pico de emissão de qualquer corpo na faixa de temperatura de – 50ºC à 50ºC. É também comum na literatura a notação: SWIR – “*Short Wavelength Infrared*”, MWIR – “*Middle Wavelength Infrared*” e LWIR – “*Long Wavelength Infrared*” para as faixas acima, porém, os termos mais comuns são: NIR, MIR (*Middle Infrared), FIR (Far Infrared)* conforme Figura 4.

Figura 4 - Espectro de transmissão da atmosfera terrestre, nas faixas do infravermelho próximo, médio e distante



Fonte: **Adaptado de** http://www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/espectro.htm

Mesmo que a radiação no infravermelho próximo tenha sido descoberta antes da radiação no infravermelho médio, a espectroscopia NIR, a princípio, foi negligenciada por pesquisadores da área.

Era sabido que os espectros no infravermelho continham uma grande quantidade de informações sobre a amostra e assim, apresentavam elevado potencial para serem utilizados em inúmeros tipos de análises químicas e físicas. Contudo, existia grande dificuldade em extrair informações relevantes, uma vez que as bandas de absorção na região NIR são produto de sobretons e da combinação de bandas fundamentais de vibração (PASQUINI, 2003.)

Uma outra observação utilizada na espectroscopia trata-se da observação feita por Beer em 1852, em que relata a existência de uma relação entre a transmissão de um feixe de luz e a concentração do meio em que propaga, ou seja, "A intensidade de um feixe de luz monocromático decresce exponencialmente à medida que a concentração da substância absorvente aumenta aritmeticamente" (COMPRI-NARDY, et al, 2009).

A análise espectroscópica, ou apenas espectroscopia, foi posteriormente ampliada, utilizando-se outras radiações além da luz visível, como o ultravioleta e

o infravermelho, tornando-se uma das mais poderosas ferramentas da química (CHAGAS, 2011).

1.3 Monitoramento atmosférico via FTIR

As informações de sátelite vêm da análise da radiação solar refletida pela superfície terrestre. Este tipo de coleta tem seus dados comprometidos pela presença de nuvens, aerossóis e pelo albedo, que é bem significativo na região da Floresta Amazônica.(ECHER, MARTINS & PEREIRA, 2006; ARTAXO, et. al, 2006)

As medições feitas a partir do equipamento de Infravermelho são realizadas mediante a incidência direta da radiação solar, não sofrendo influencia da nebulosidade e do albedo.

Neste trabalho foram utilizados os dados medidos pelo Bruker 125M FTIR, e esta investigação da composição química da atmosfera e da sua evolução ao longo do tempo coloca esta estação de monitoramento atmosférico, instalada em Porto Velho Rondônia, como participante de redes internacionais de monitoramento como: NDACC (*Network for the Detection of Atmospheric Composition Change*) e TCCON (*Total Carbon Column Network*), bem como tornar-se um local de estudo de monitoramento atmosférico da Rede Brasileira.

As medições de GEE estão concentradas, em sua maior parte, no Hemisfério Norte, o que evidencia que o Hemisfério Sul é pobremente estudado e, portanto, mal representado nas medias globais da Rede mundial.

Esta deficiência traz consequências nos modelos de previsões climáticas. Além desta baixa densidade de informações, tem-se o agravamento da floresta amazônica também ser ainda insuficientemente estudada.

O estabelecimento de um ponto de medidas com o instrumento Bruker 125M FTIR (Figura 5), em Porto Velho Rondônia, representa um progresso no panorama global de medidas de GEE, entre outros que compõe a atmosfera, além de enriquecer com dados as medições na Amazônia.

Figura 5 - Espectrômetro Bruker 125M FTIR, de alta resolução instalado no Campus Porto Velho Calama do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia.

Fonte: Arquivo do Autor.

Estas medidas têm uma abrangência: local e regional, que representam uma contribuição no conhecimento da concentração global, sua variabilidade e auxílio na melhoria das medidas com satélite.

O Bruker 125 FTIR, é um espectrômetro de alta resolução em FTIR que foi concebido para executar operações de campo e medidas atmosféricas precisas da superfície até o sol (coluna total) de GEE, Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), além de outras espécies. Estes compostos podem ser medidos tanto usando o sol, como fonte ativa de Radiação Infravermelho (IR) medindo sua transmitância, como também em modo de emissão passiva.

1.4 As medidas dos gases de efeito estufa (GEE) no Hemisfério Sul

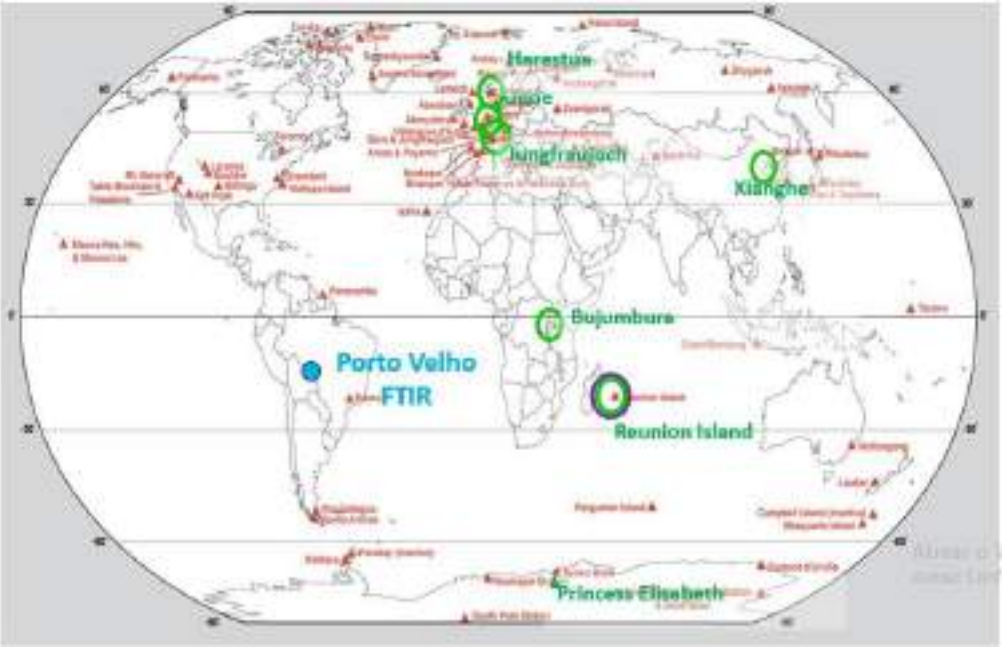
A motivação e a originalidade deste trabalho, estão relacionadas as medições de GEE no Hemisfério Sul, considerando que são pobremente estudadas. Haja vista, que as maiores concentrações de estudos e medidas estão, em sua maior parte, no Hemisfério Norte. Desta forma, deixando o local de estudo mal representado nas medidas globais da Rede mundial. Esta deficiência traz consequências nos modelos de previsões climáticas.

Desta forma, a localização do site de pesquisa, em Porto Velho Rondônia, é privilegiada pela sua posição na parte sudoeste da Bacia Amazônica. As medidas

serão representativas sobretudo no que diz respeito ao que acontece com a massa de ar, ao percorrer, desde a entrada no continente atravessando toda a bacia amazônica até a chegada no local de medida. O local escolhido seguiu esta premissa e representará um grande avanço no conhecimento do comportamento das emissões de gases na Bacia Amazônica. Os resultados obtidos vão auxiliar no entendimento das mudanças nos processos químicos e físicos da atmosfera

A Figura 6, apresenta a distribuição global dos sites de pesquisa que compõem a rede de estudos para detecção das mudanças climáticas do *Belgian Institute for Space Aeronomy* (BIRA-IASB) e, demonstra que as medidas de GEE se concentram, em sua maioria no Hemisfério Norte.

Figura 6 – Localização dos sites de pesquisa, que compõem a Rede para a detecção de mudança de composição atmosférica do BIRA – IASB



Fonte: Adaptado de BIRA – IASB

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho, tem como objetivo a caracterização química dos gases na atmosfera, considerados GEE (CH_4, N_2O e O_3), COVs: Acetileno (C_2H_2), Etanol (C_2H_6), Formaldeído (H_2CO) e Ácido Cianídrico (HCN) e o Monóxido de Carbono (CO) (que não é um GEE, mas sim traçador de queimadas), gases que interferem no clima e no ecossistema da Bacia Amazônica, utilizando a técnica da espectroscopia de FTIR.

2.2 Objetivos Específicos

1) Otimizar a análise das medidas dos gases: CO, CH_4, N_2O, O_3 e VOCs como C_2H_6, HCN, C_2H_2 e H_2CO, entre outros que são medidos via espectrômetro Bruker 125 FTIR, que trabalha com medidas do perfil vertical em Porto Velho/Rondônia.

2) Estudar a variabilidade das concentrações de gases da química da atmosfera no período de estudo, e possíveis contribuições climáticas através da construção de um algoritmo para avaliação dos dados (concentração dos gases e variáveis climáticas: Previsão de chuva e chuva efetiva).

3) Associar os dados obtidos com mudanças climáticas desta região.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A floresta amazônica constitui um reservatório global de carbono, onde a biosfera interage intensamente com a atmosfera. Esta interação está sendo alterada pelas mudanças do uso da terra, de queimadas, desflorestamento, agricultura, reflorestamento e outros processos (NEPSTAD et al., 1999; 2002).

3.1 Amazônia e bioma amazônico

A Floresta Amazônica constitui um dos ecossitemas da Terra e também corresponde cerca de 50% das florestas tropicais do mundo segundo GLOOR (2012).

A floresta Amazônica, tem uma área total que, praticamente, representa a metade do território Sul Americano e equivale à aproximadamente 8.10^6 km² (GATTI et al, 2014). A maior parte da floresta (60%) está localizada no território Brasileiro, identificado como Amazônia Legal que abrange uma área de $5{,}08.10^6$ km² (PERZ et.al, 2005; GLOOR, et. al. 2012).

A Amazônia sofre com a ação do homem pela exploração da madeira, transformação da floresta em outras formas de exploração dos seus recursos (GATTI et al, 2010). Representa o maior banco genético do mundo e contém 1/5 da água doce disponível no planeta, além de um patrimônio mineral não mensurado (MCT, 2010).

O Bioma Amazônico sofre com o desmatamento, e a dinâmica de mudança no uso do solo e nesta dinâmica é observado que inicialmente a floresta torna-se área de pastagem e posteriormente é alterada para agricultura.

Os ecossistemas amazônicos compreendem os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e parte dos estados do Maranhão, Tocantins e Mato Grosso. A figura 7, apresenta os Estados que compõem a Amazônia Legal, que está registrada no mapa pela região marcada com a cor verde.

Figura 7: Mapa apresentando os estados que compõem a Amazônia Legal (marcados na cor verde).

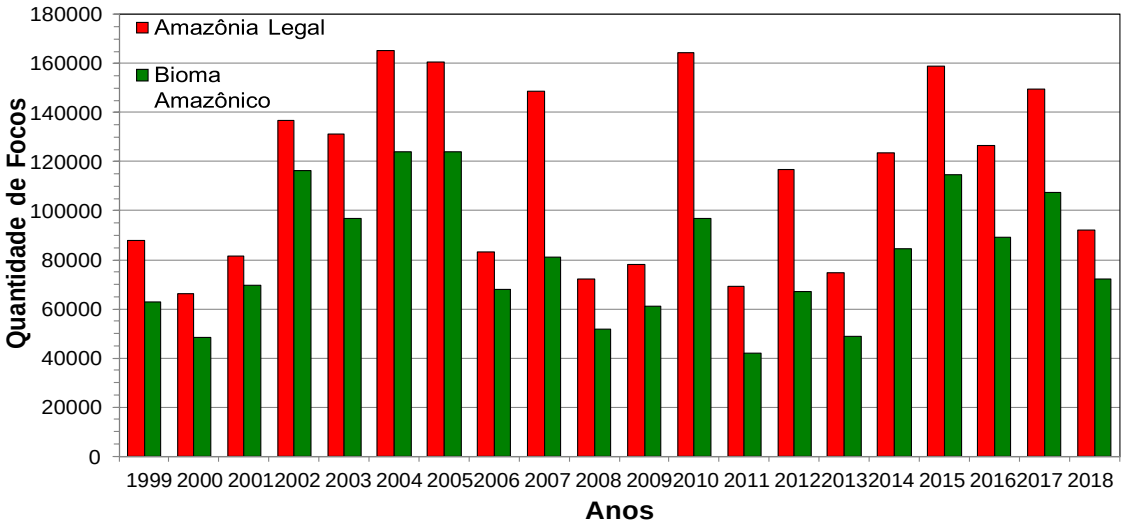
Fonte: Adaptado do Instituto de Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Disponível no site: https://geoftp.ibge.gov.br

A destruição da floresta leva à liberação do carbono armazenado na vegetação, e, como tal, contribui para a mudança climática, além de causar um grande desequilíbrio no ciclo da água. A floresta amazônica é também uma grande fonte de emissões de queimadas que afetam outras partes do globo (FREITAS, et. al. 2005; GABARDO, SARZEDAS & DA SILVA, 2021).

Segundo GLOOR *et al.* (2012) a quantidade de carbono acumulada na floresta representa aproximadamente metade do total de carbono contido na atmosfera, antes da Revolução Industrial no século XVIII, portanto este é um ambiente que deve ser entendido e cuidado, pois este carbono acumulado pode ser rapidamente liberado para a atmosfera pelas queimadas e desflorestamento.

Na Figura 8, é mostrada as variações dos focos de queimada em uma série temporal de 1999 a 2018, onde identificamos que após um período de queda na ocorrência das queimadas (entre aproximadamente 2006 e 2013), o número de queimadas vem aumentando ao longo dos últimos anos, tanto para Amazônia Legal, quanto para o Bioma Amazônico.

Figura 8 - Focos de queimadas na Amazônia Legal e no Bioma Amazônico.



Fonte: **Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios, Disponível em** http://www.inpe.br/queimadas.

Apesar do impacto significativo da floresta amazônica na atmosfera em escala global, observações da composição atmosférica sobre a floresta Amazônica ainda são insuficientes.

3.2 Sistema climático amazônico – Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

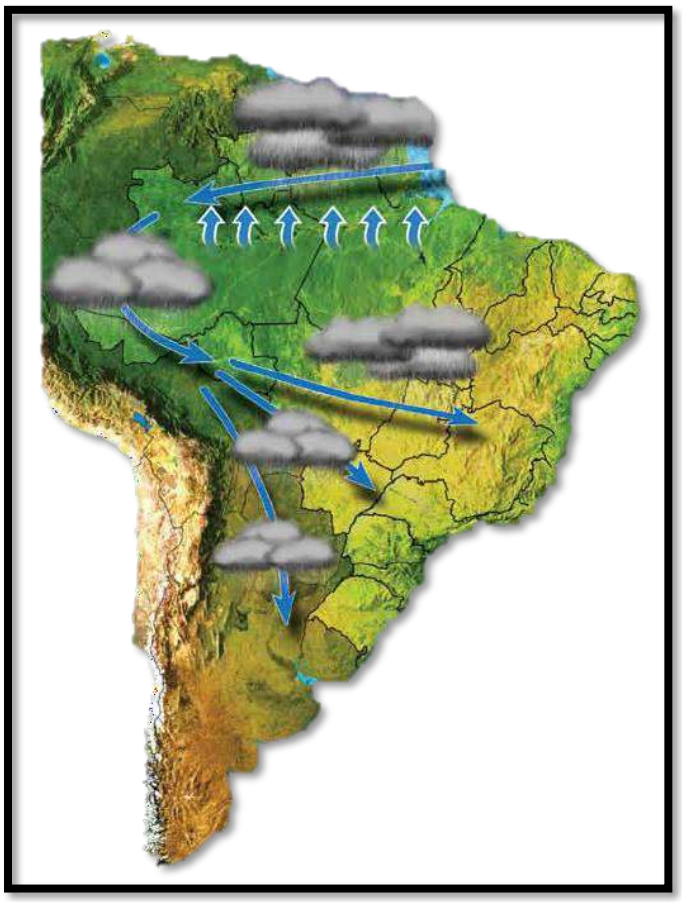
Pesquisas recentes mostram uma ligação significativa entre o sistema climático amazônico e o clima em outras regiões do Brasil. O transporte de vapor de água amazônico pelas massas de ar denominadas rios voadores (ou rios aéreos), é pouco conhecido. E tão pouco imaginam que o volume de vapor de água lançado pelas árvores da floresta amazônica na atmosfera pode ter o mesmo valor em grandeza da vazão encontrada no rio Amazonas que é de 200.000 m^3/s (DA SILVA, BARBOSA & COUTINHO 2019, MOSS, 2015).

A ZCAS é um dos principais sistemas meteorológicos causadores de chuva na região centro-sul do Brasil, nos meses de primavera e verão. Essa nebulosidade, que segue da bacia Amazônica, passa pelo sudeste do Brasil chegando ao oceano Atlântico Sul.

Vários estudos são realizados para identificar a relação entre os sistemas climáticos da Amazônia e outras regiões do Brasil. Um deles, o Projeto Rios Voadores, buscou identificar a relação entre os sistemas climáticos da Amazônia e da Bacia do Prata, que tem faixas territoriais no Brasil, Argentina, Paraguai, Uruguai e Bolívia. No Brasil um ecossistema importante, nessa bacia, é o Pantanal. Este projeto foi idealizado pelo aviador Gérard Moss e Antonio Donato Nobre e, contou com a ajuda dos colaboradores: Enéas Salati, José Morengo, Pedro Dias, Reinaldo Victoria e Marcelo Moreira que, projetou o equipamento para coleta do vapor de água durante os voos (https://riosvoadores.com.br).

A Figura 9 apresenta o caminho dos Rios Voadores, que é o mesmo das massas de ar que transportam os GEE, desde a entrada no continente, até a passagem pelo site onde está instalado o Bruker 125M FTIR.

Figura 9 - Caminho dos rios voadores a partir da entrada das massas de ar no Continente



Fonte: Adaptado de https://riosvoadores.com.br

Em estudo sobre a ZCAS, SILVA et. Al (2019) apresenta uma análise dos eventos meteorologicos envolvidos no periodo de 2006 a 2017, ligados a sistemas de baixa pressão no oceano Atlântico Sul, que indicam um padrão atmosférico distintos da climatólogia de verão, devido a circulação em altos niveis mostrando um cavado entre o sul do Brasil e o oceano Altântico, que auxilia os movimentos ascendentes, na região oceânica de ZCAS. Esses eventos de ZCAS ocorrem acoplados a ciclones no Atlântico Sul, onde eles têm como ponto forte a umidade que vem da Amazônia.

Em suas conclusões, SILVA et. Al. (2019), informa que de 2006 a 2017, foram registrados 114 casos de ZCAS e o mês de mais frequência foi dezembro, enquanto o de menor frequência foi abril.

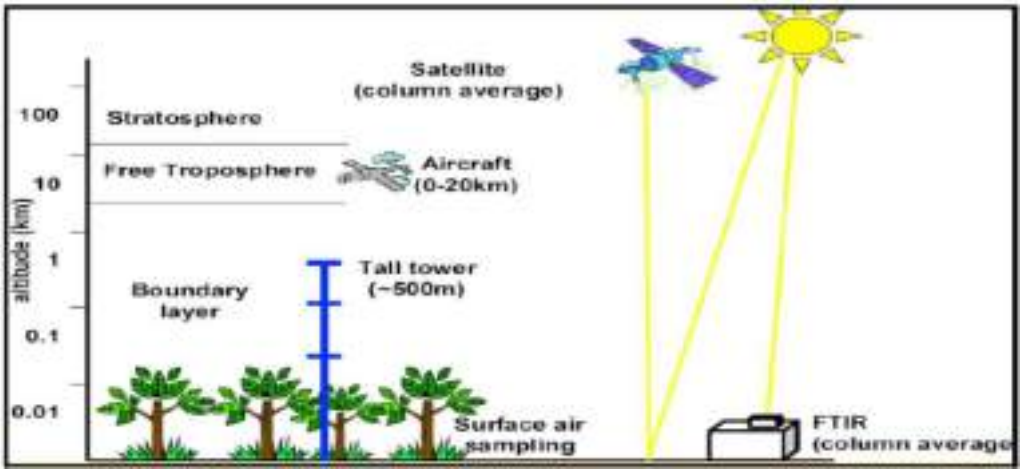
3.3 Ferramentas de observação e coleta de dados atmosféricos

Uma ferramenta de observação em grande escala do impacto na floresta Amazônica é feita utilizando satélites, pois além de abranger grandes áreas, também representam uma frequência de observações difícil de serem reproduzidas com outras técnicas de observação de grande escala. Porém suas medições precisam ser validadas com observações de alta qualidade e precisão, preferencialmente por observações terrestres remotas que são mais comparáveis, em termos das massas de ar sondadas e as técnicas instrumentais, além de perfis verticais com aviões. O que ressalta a contribução deste estudo na região Amazônica.

Na Figura 10 são apresentados vários métodos de medida em diferentes escalas. Os métodos variam desde estudos com câmara sobre o solo (a menor escala), passando por torres (de 3 a 80 m), que ainda representam uma escala local. As torres altas (de 200 a 500 m) representam uma escala mais próxima ao regional. Medidas com aviões podem realizar medidas desde a superfície até próximo a estratosfera.

As medições feitas a partir do equipamento de Infravermelho FTIR são realizadas através da incidência direta da radiação solar, não sofrendo influência da nebulosidade e do albedo. O comprometimento das medidas, feitas com o espectrometro, fica por conta dos dias chuvosos, essa condição climática impede que o equipamento entre em operaçao.

Figura 10 - Coletas em loco versus sensoriamento remoto.



Fonte: Adaptado de *Belgian Institute for Espace Aeronomie.*

3.4 Espectroscopia

Espectroscopia observa um determinado espectro, enquanto a espectrometria mede o espectro de radiação, assim, não devemos confundi-las. A proposta não é sobre conceitos ópticos da radiação aplicados a observação do espectro, mas da avaliação do espectro, e de como ele ocorre.

O estudo feito pela espectroscopia tem como objetivo a interação das radiações eletromagnéticas com moléculas ou partículas. Os métodos espectroscópicos de análise são baseados na medida da quantidade de radiação produzida ou absorvida pelas moléculas ou pelas espécies atômicas em determinados comprimentos de onda (SKOOG, et al, 2011).

OLIVEIRA (2001) identifica a espectroscopia como a visualização de um fenômeno físico denominado espectro, provocado pela influência entre a radiação eletromagnética e a matéria, o resultado óptico resultante dessa interação, passa a ser um instrumento de medição, desse mesmo fenômeno.

Em termos genéricos, podemos definir espectroscopia como a interação de qualquer tipo de radiação eletromagnética com a matéria (OLIVEIRA, 2001).

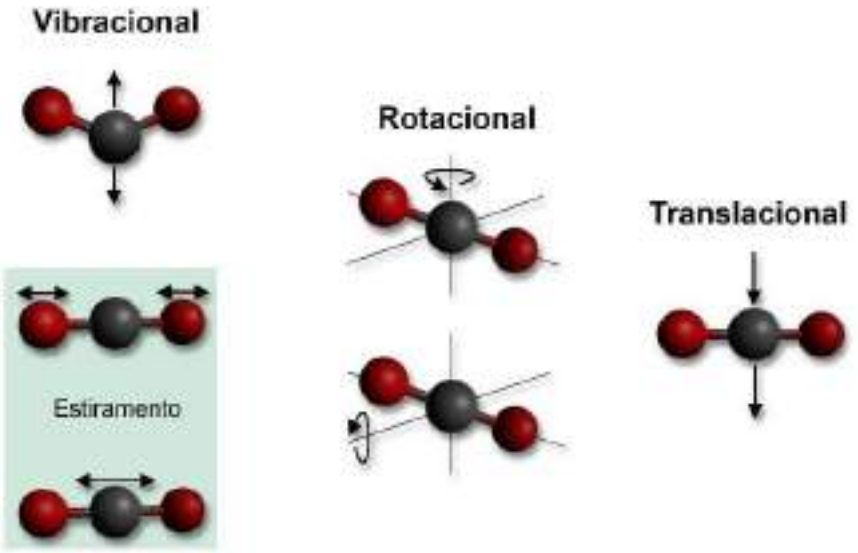
Para a obtenção dos espectros, foram abordados particularmente os métodos que empregam emissão ou absorção das radiações eletromagnéticas que agem sobre os átomos e moléculas. Interagindo com os elementos e compostos químicos em análise, expondo seu estado de energia.

Devemos salientar, que nos casos de moléculas com mais de um elemento químico os espectros dos átomos que a compõem, vão formar configurações espectrais diferentes de quando isoladas, pois os níveis de energia nas transições ocasionadas pelas ligações entre átomos, mudam expressivamente.

Na espectroscopia com radiação na região do visível, observamos emissões causadas pelas transições nos diversos níveis da estrutura atômica, sem a obrigação de estudos dos movimentos realizados pelas moléculas, porém na espectroscopia com infravermelho os movimentos estimados são os de estiramento, tendo em vista que cada tipo de molécula reage de forma particular na emissão ou absorção do infravermelho, onde as transições de níveis ocorrem no estado vibracional, rotacional e translacional da molécula. BELO (2013), em seu estudo sobre o comportamento vibracional de monocristais de D-alamina (DALA) DL-alamina, apresenta resultados aplicando técnicas de espectroscopia.

A Figura 11 apresenta os tipos de movimentos possíveis realizados pelas moléculas conforme seu estado de agitação.

Figura 11 - Tipos de movimento realizados por moléculas conforme seu estado de agitação.



Fonte: Adaptado de https://sites.google.com/site/shiftingpedagogy/insights

No infravermelho, onde ocorre a excitação vibracional das moléculas, encontramos uma região no espectro chamada “Região de Impressão Digital”, que possibilita identificar alguns grupos funcionais importantes de compostos químicos, até mesmo compostos desconhecidos que apresentam características análogas em relação a uma referência. Por esse motivo o uso de espectrômetro no infravermelho é amplamente aplicado nos estudos atmosféricos, por permitir o reconhecimento de grupos importantes em que outras regiões do espectro não permitem alcançar com eficiência. ZHOU, et al (2020), aplica as técnicas de espectroscopia no infravermelho para seu estudo de recuperação de ozônio (O_3) de medidas terrestres de absorção solar, utilizando FTIR, dentro da rede NDACC medidas feitas em Xianghe na China.

A Tabela 2, mostra os tipos de excitações de moléculas em relação a faixa de comprimento de onda.

Tabela 2 - Distribuição de grupos moleculares dentro do espectro.

Região do Espectro	Tipo de Excitação	Comprimento de Onda (nm)
Ultravioleta	Eletrônica	100 – 350
Visível	Eletrônica	350 – 800
Infravermelho	Vibração	800 – 300.000
Rádio	Spin	1.000.000

Fonte: Adaptado de http://www3.fsa.br/materiais/introespect.pdf

Na da região do infravermelho encontramos subdivisões, que estão distribuídas conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Distribuição das subdivisões do infravermelho.

Infravermelho	Comprimento de Onda (nm)
Próximo - NIR	750 ~ 3000
Médio - MIR	3000 ~ 6000
Distante - FIR	6000 ~ 15.000
Extremo - XIR	15.000 ~ 1.000.000

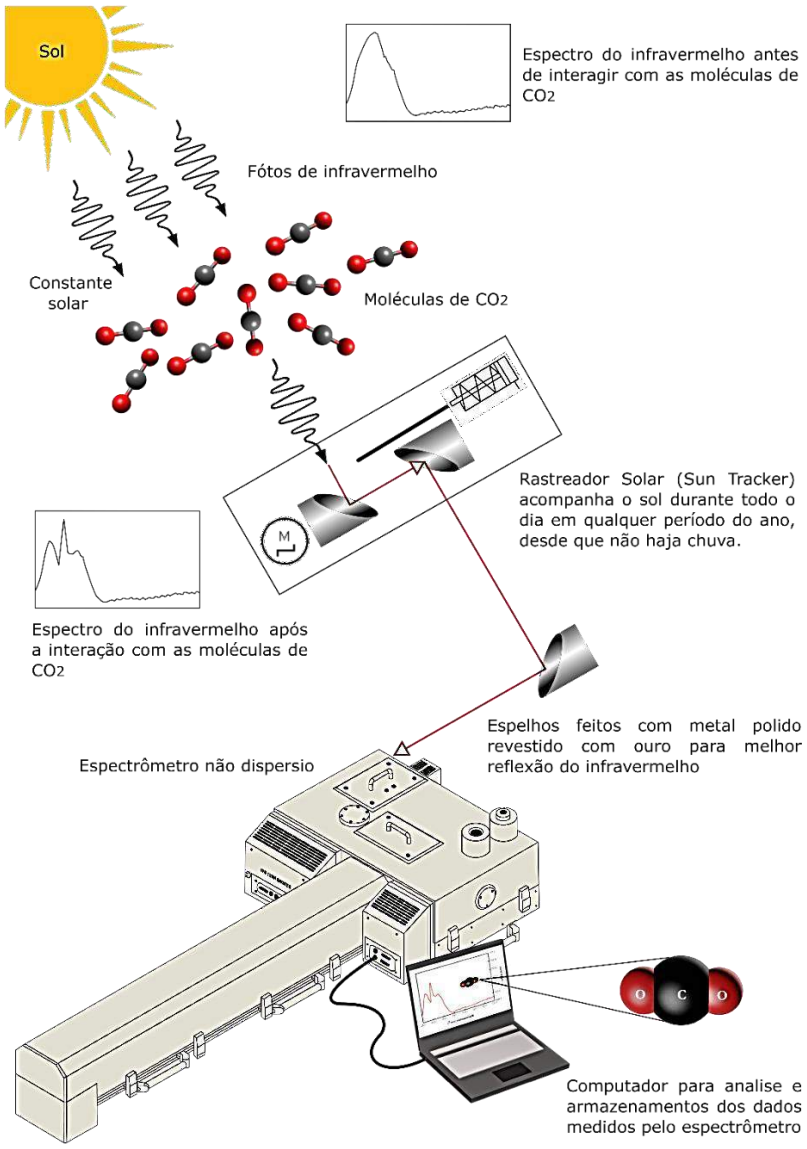
Fonte: Adaptado de http://www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/espectro.htm

3.4.1 Espectroscopia no Infravermelho

Diversos compostos que apresentam ligações covalentes, orgânicos ou inorgânicos, absorvem frequências na região do infravermelho. Provocando uma variação/diferença de temperatura nos pontos de absorção, criando o princípio aplicado na espectrometria no infravermelho.

A Figura 12 apresenta um esquema básico de espectroscopia, que utiliza como fonte de radiação no processo de identificação das moléculas na atmosfera, a radiação solar, que tem amplo espectro, tornando-se ideal para medições de gases atmosféricos.

Figura 12 - Esquema básico de espectroscopia, que utiliza o Sol como fonte de Radiação.



Fonte: **Adaptado do manual do Bruker IFS 125M.**

Após interagir com as moléculas da atmosfera, a radiação passa a transportar informações, que serão conduzidas pelo caminho óptico do equipamento, passando pelo interferômetro até chegarem aos detectores convertendo-se em sinais elétricos do tipo analógico para digital.

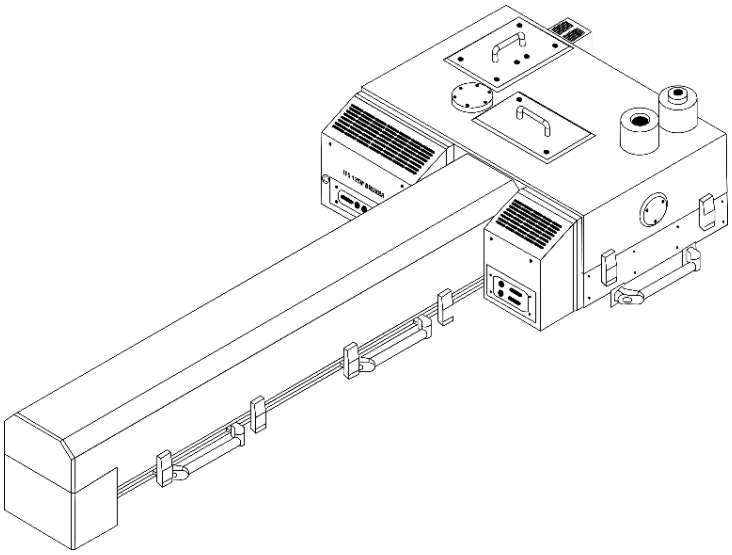
Os princípios básicos da espectroscopia receberam técnicas avançadas de análise e cálculos computacionais para os mais diversos fins, porém o avanço mais significativo para a espectroscopia no infravermelho foi o surgimento do interferômetro aliado ao método de cálculo da transformada de Fourier.

3.4.2 Espectrômetro Bruker 125M FTIR

O Espectrômetro IFS 125M da *Bruker*, está classificado como espectrômetro não dispersivo, e tem por finalidade identificar compostos químicos por meio da espectrometria da atmosfera na região do infravermelho.

A Figura 13 mostra um desenho do espectrômetro *Bruker* IFS 125M FTIR, que está instalado no Campus Porto Velho Calama do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia, fruto de uma parceria belgo-brasileira para o estudo da atmosfera acima da Floresta Amazônica.

Figura 13 - Espectrômetro Bruker IFS 125M FTIR



Fonte: Adaptado do manual do Bruker IFS 125M.

Fabricado na Alemanha pela *Bruker* Optik GmbH, este equipamento é muito flexível na troca de componentes, permitindo realizar medições em um amplo espectro em conformidade com os tipos de detectores e divisores de feixes (*beam splitter,*) disponíveis para instalação, abrangendo regiões espectrais do ultravioleta (UV) ao MIR.

A instalação na localidade de Porto Velho, justifica-se pela escassez de medidas de gases da composição atmosférica sobre a floresta Amazônica, que vão possibilitar a validação dos dados observados pelos satélites.

Como muitas observações de satelite não estão em acordo quanto aos valores de concentração de gases do efeito estufa, devido ao albedo da floresta

(baixa reflexão), um observatório atmosférico com equipamento de espectrometria FTIR, operando no MIR (1,25 ~ 5,50 mm), na localidade de Porto Velho, torna-se significativo para a comunidade científica internacional.

3.4.3 Rastreador solar (*Suntracker*)

Para manter uma constância e garantir a máxima intensidade de radiação solar detectada pelo espectrômetro, é necessário a realização de rastreamento solar de forma independente pelo período que se realize as medições durante o dia.

Esses aparelhos de posicionamento solar, vem sendo adotados nos últimos anos. O rastreador solar não é um equipamento novo, sua aplicação é muito conhecida na astronomia e seu funcionamento baseia-se nos sistemas de relógio solares usados a séculos.

Nos rastreadores solares mais simples, são utilizados anteparos, para projetar sombras sobre sensores que informam ao sistema de automação (motores de passo) as correções necessárias para seu correto posicionamento em relação ao sol a cada intervalo de tempo programado. Assim, os sensores ficarão constantemente apontados para o sol.

Sistemas de rastreamento solar mais sofisticados utilizam motores de passos com movimentos angulares controlados por softwares que utilizam imagens de câmeras direcionadas para o sol, tornando o rastreamento extremamente preciso para calcular a posição do sol, em relação ao centro da abertura de entrada da radiação no espectrômetro, como o utilizado no rastreador solar do espectrômetro Bruker IFS 125M.

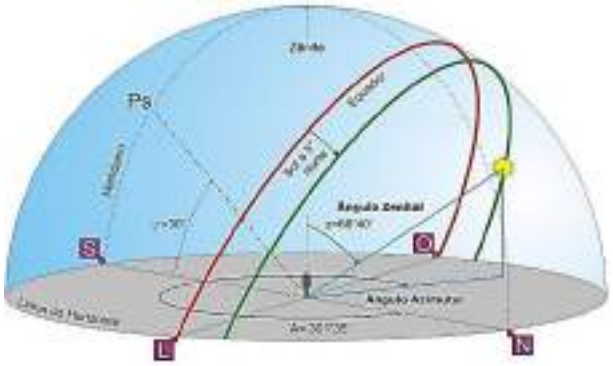
A Figura 14, apresenta o rastreador solar utilizado pelo Bruker IFS 125M, em Porto Velho.

Figura 14 - Rastreador solar utilizado pelo espectrômetro Bruker IFS 125 M

Fonte: **Arquivo do autor.**

A Figura 15 apresenta os ângulos azimutal e zenital que variam em função do movimento do sol. São esses movimentos angulares que os motores de passo do rastreador solar utilizam para ajustar sua precisão de movimento ao seguir o sol durante o período de medições.

Figura 15 - Ângulos Azimutal e Zenital da movimentação solar.



Fonte: **Adaptado de http://www.if.ufrgs.br/ - Prof.ª Maria de Fatima O. Saraiva.**

No rastreador solar utilizado no espectrômetro Bruker IFS 125M, emprega espelhos que refletem a radiação solar para o interior do espectrômetro, direcionando a radiação infravermelha para os detectores, instalados em seu interior, através de um caminho óptico constituído por espelhos, lentes e filtros.

No eixo do motor de passo que controla o movimento zenital, é fixado um cilindro metálico, com um corte a 45°, que é polido e revestido por uma fina camada de ouro que proporciona a melhor reflexão do infravermelho.

3.4.4 Interferômetro

O interferômetro é um dispositivo que pode ser usado para medir comprimentos ou variações de comprimento de onda, com grande precisão por meio de franjas de interferência.

Essas figuras de interferência ou franjas são mais perceptíveis após a difração, podendo ser facilmente verificadas em um anteparo, quando a luz passa por uma fenda estreita ou orifício.

A interferência é um fenômeno de característica ondulatória que ocorre quando ondas passam pelo mesmo ponto (fendas ou orifícios) no espaço, ao mesmo tempo, apresentando como resultando, pontos de interferência que podem

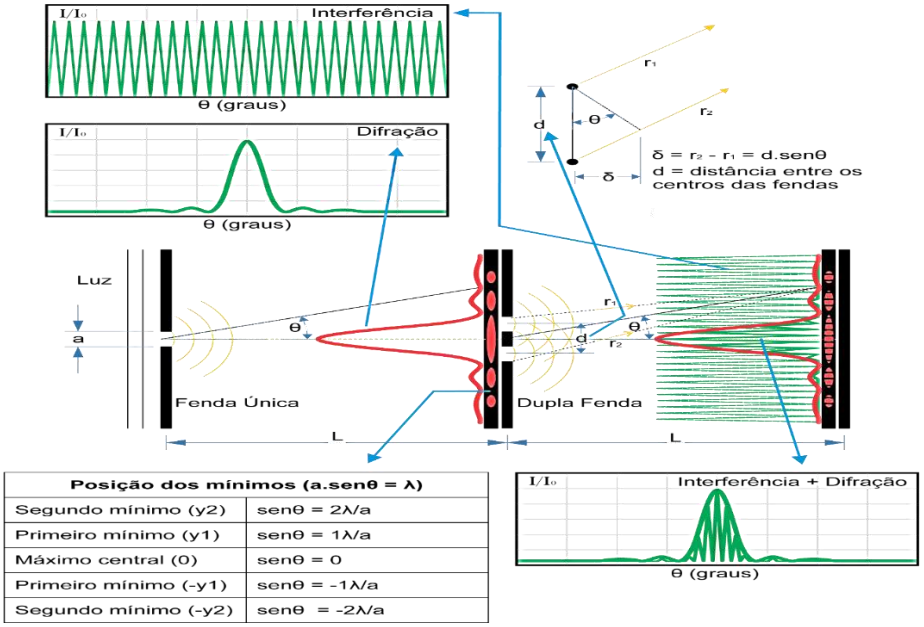
ser construtivas ou destrutivas, dependendo apenas de suas fases. Ela é mais perceptível após a difração.

Assim, haverá interferências claras e escuras nos pontos de interferência, sendo possível notar uma franja central com brilho intenso, nomeado máximo central e uma série de outros máximos laterais com brilho menos intenso, bem como as franjas escuras nomeadas de mínimos, onde ocorrem as interferências destrutivas.

Na Figura 16 temos uma representação dos fenômenos de difração e interferência, que fornecem alguns conceitos básicos dos cálculos de posição das franjas em relação ao máximo central. Também é possível verificar o que ocorre com as figuras de interferência da difração e da interferência quando a luz passa por uma fenda e depois por duas fendas, gerando um padrão de figura característico, conhecido como interferograma.

O interferômetro de Michelson, o mesmo modelo utilizado pelo espectrômetro Bruker IFS 125 M, foi criado, a princípio, para testar a existência de um meio para a propagação da luz. O interferômetro acabou se tornando uma formidável ferramenta para o estudo de uma série de fenômenos ligados à propagação da luz e sua interação com a matéria, estudos esses de fundamental importância para a espectrometria óptica.

Figura 16 - Fenômenos de difração e interferência. Cálculos básicos de posições das interferências.



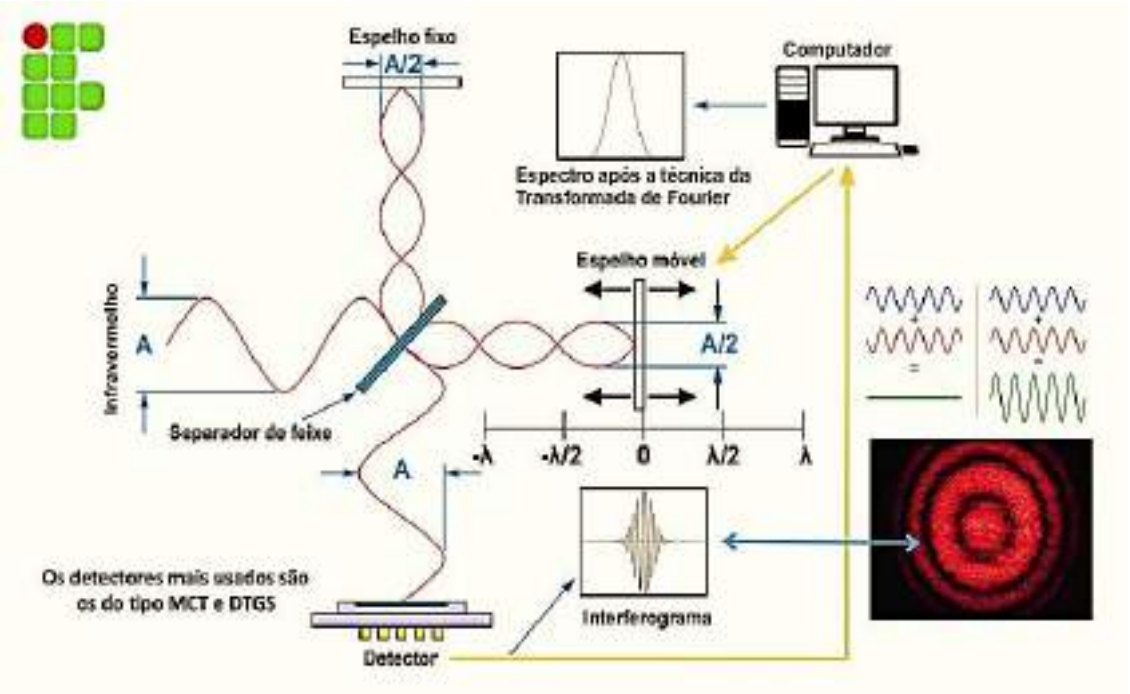
Posição dos mínimos (a.senθ = λ)	
Segundo mínimo (y2)	senθ = 2λ/a
Primeiro mínimo (y1)	senθ = 1λ/a
Máximo central (0)	senθ = 0
Primeiro mínimo (-y1)	senθ = -1λ/a
Segundo mínimo (-y2)	senθ = -2λ/a

Fonte: **Arquivo do autor.**

A Figura 17, mostra o funcionamento do interferômetro de Michelson, controlado por computador, onde a onda luminosa é desmembrada em dois feixes pelo *beam splitter* (espelho móvel) que, após percorrer trajetórias diferentes, são recombinados para produzir uma figura de interferência, como as produzidas por fendas.

As interferências construtiva e destrutiva, ao serem projetadas sobre o detector, são transformadas em sinais elétricos (interferograma) e enviadas a um computador para processamento e apresentação de resultado da identificação do elemento químico, conforme seu espectro.

Figura 17 - Funcionamento do interferômetro de Michelson controlado por computador.



Fonte: **Arquivo do autor.**

O espelho móvel tem como função fazer variar a distância do trajeto de um dos feixes. Quando o computador desloca este espelho a uma distância d, o feixe propaga-se no dobro deste deslocamento (ida e volta), e observa-se a ocorrência de um número de franjas Δm. Aplicando a equação Δm = (n/ λ0)2d, onde n é o índice de refração do meio (ar), Δm a variação do número de franjas (número de máximos ou mínimos que “passam” por um dado ponto no detector para um deslocamento d do espelho móvel), d a distância de deslocamento do espelho (em

sistemas não automatizados utiliza-se micrómetro), podemos obter o comprimento de onda da franja central λ_0 ou comprimento da luz que percorre o caminho óptico. A incerteza, neste tipo de medida, é de ± meia franja.

Assim, as franjas que chegam ao detector são registradas pelo computador quando elas mudam de claras para escuras, permitindo sua contagem e posteriormente o cálculo dos comprimentos de onda da luz monocromática, gerando também um do padrão de interferograma, que passará pela técnica de Transformada de Fourier.

3.4.5 Detector

Detectores são dispositivos projetados para medir radiações espectrais, e são normalmente instalados em equipamentos denominado radiômetro.

O termo detector é genérico podendo significar, dentre outras coisas, um filme fotográfico ou um termômetro, concluindo-se que um detector ou sensor de radiação infravermelha é um transdutor de energia eletromagnética, isto é, um dispositivo que converte a energia radiante incidente sobre o mesmo em alguma outra forma conveniente de sinal mensurável, geralmente, um sinal elétrico (BOSCHETTI, 2008).

Em geral, a radiação absorvida interage com o detector gerando uma forma de sinal elétrico que é processado por um circuito eletrônico associado, que pode ser: amplificadores de sinais ou conversores analógicos/digitais.

Nas pesquisas atmosféricas os detectores são, em geral, classificados em detectores térmicos e fotodetectores (detectores fotoelétricos).

O funcionamento dos detectores térmicos, baseia-se em transformar energia radiante em energia térmica, com seu funcionamento relacionado a um potencial elétrico (ex. piroelétricos, calorímetros, termopares e outros).

Os detectores fotoelétricos são ativados por eventos discretos de fótons, ao incidir sobre o material, sem depender da variação de temperatura, dessa forma apresentando respostas mais rápidas, denominadas de *ultrafast*, velocidade comumente encontrada nos componentes semicondutores (YAMOSOE, et al 2016).

Na espectroscopia que se aplica FTIR, os detectores mais utilizados são os piroelétricos que são fabricados, normalmente, com sulfato de triglicina deuterada

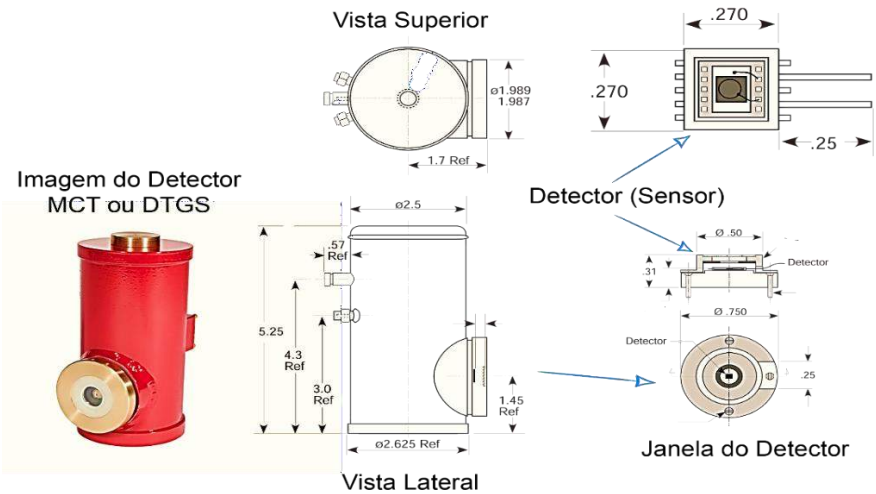
(DTGS - *Tri-Glycine Sulphate Deuterated*), Tantalato de Lítio ($LiTaO_3$ - Lithium Tantalate) e Titanato de Zinco e Chumbo (PZT - Lead Zinc Titanate), podendo também ser aplicado alguns polímeros com as mesmas propriedades piroelétricas. Frequentemente, os detectores piroelétricos não necessitam polarização elétrica e podem trabalhar nos modos: de corrente e de tensão, tornando-os bastante flexíveis e muito empregado nas construções de radiômetros para medidas de potências ópticas, em uma ampla faixa do espectro (CIENFUEGOS, 2003).

Quando são necessárias maior sensibilidade ou altas velocidades de detecção utiliza-se um detector de Telureto de Cádmio e Mercúrio (MCT), que possui capacidade fotocondutiva e pode operar à temperatura do nitrogênio líquido, abaixo de – 196°C.

Os detectores mais utilizados na região *standard* (banda espectral em cm^{-1}) são construídos à base do material piroelétrico Sulfato de Triglicina Deuterada (DTGS), que podem operar entre 12000 a 350 cm^{-1}. E opcionalmente podemos utilizar o detector MCT. Os equipamentos mais sofisticados utilizam de detectores especiais, resfriados com nitrogênio ou hélio líquidos. O uso de detectores com resfriamento aumenta acentuadamente a sensibilidade destes detectores (ALVES, 2018).

Na Figura 18, temos a imagem de um detector similar aos utilizados pelo espectrômetro Bruker 125M FTIR, demonstrando a localização do componente fotocondutor (sensor IR).

Figura 18 - Detector similar ao utilizado pelo Espectrômetro Bruker 125M FTIR.



Fonte: **Adaptado de** http://www.teledynejudson.com/products/dewars-and-coolers

Com relação a faixa de trabalho, temos algumas versões para o MCT quando usam-se divisores de feixe de brometo de potássio recoberto em germânio (Ge/KBr), para região espectral de 8.000 a 250 cm^{-1}), que são banda larga (*broad band* – 7000 a 420 cm^{-1}), banda média (*medium band* - 6000 a 600 cm^{-1}), e banda estreita (*narrow band* – 5000 a 780 cm^{-1}), sendo esta última a que permite uma sensibilidade três vezes maior que as demais faixas e aproximadamente dez vezes maior que a possível, com o DTGS. (CIENFUEGOS, 2003).

3.4.6 Transformada de Fourier

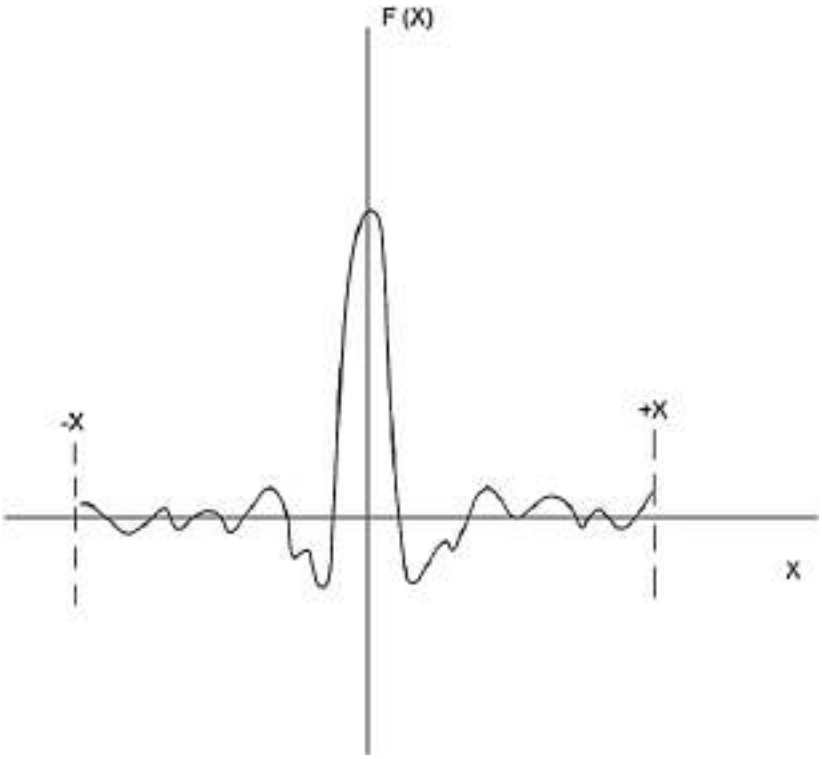
Observa-se uma mudança significativa no desenvolvimento dos espectrômetros infravermelhos na década de 70. Antes disso, os equipamentos baseavam-se nos princípios dispersivos com a presença de primas, fendas, redes de difração, e outros. Assim, começaram a ser, paulatinamente, substituídos por novos equipamentos com base nos princípios interferométricos, criando uma revitalização do interferômetro de Michelson, que se consolida nos anos 80.

Valendo-se do método da transformada de Fourier, as funções periódicas geradas pelo interferômetro de Michelson, quando associadas aos modernos sistemas de computação, permitem o surgimento da “Espectroscopia do FTIR”. Devemos salientar que a transformada de Fourier e os princípios interferométricos, já eram muito conhecidos, ficando a inovação das técnicas por conta do desenvolvimento de novos algoritmos e das inumeráveis possibilidades da informática (ALVES, 2018)

A transformada de Fourier, é uma técnica que consiste, basicamente captar sinais (interferograma) gerados por interferômetro com suporte computacional, e transformá-las em sinais que permitam extrair informações importantes de espectro.

Os espectros são obtidos pelo cálculo da transformada de Fourier, do referido interferograma. A Figura 19 mostra um interferograma.

Figura 19 – Interferograma



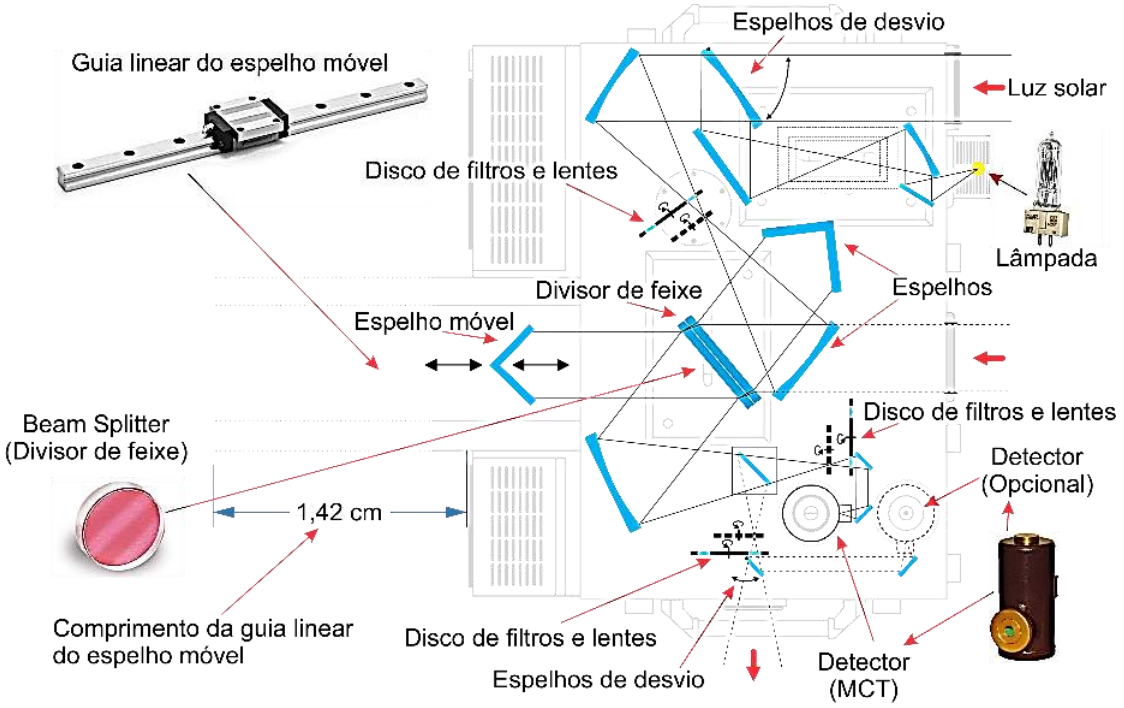
Fonte: Adaptado
http://lges.igm.unicamp.br/images/vivencia_lges_meprotec_espec_fourier.pdf

Outras metodologias de cálculo também são empregadas. Uma delas baseia-se na adição sucessiva de diversos interferogramas. Nesse caso, a transformada de Fourier é executada sobre a soma dos interferogramas. O resultado obtido com esse procedimento mostra-se por meio de um acréscimo significativo de sensibilidade.

Os primeiros processos para o cálculo da transformada de Fourier, utilizavam um tempo de computador muito elevado. Em 1965, Cooley e Tuckey desenvolveram um método denominado *Fast Fourier Transform Method*. O algoritmo recebeu o nome de algoritmo de CooleyTuckey, seu emprego permitiu a realização dos cálculos de forma mais rápida, e permitindo, que o processamento dos espectros pudesse ser feito on-line, através de microcomputadores.

Para finalizar o tópico da Espectroscopia, convém apresentar a distribuição dos diversos componentes integrantes do equipamento Bruker IFS 125 M, e seu caminho óptico. A Figura 20 mostra uma representação de detalhes internos dos componentes e dispositivos, como divisor de feixe, detector e interferômetro, podendo ser compreendido por simples aplicação da óptica geométrica.

Figura 20 - Caminho óptico completo no interferômetro do Espectrômetro Bruker IFS 125M.



Fonte: Adaptado do manual do IFS 125M da Bruker

Hoje em dia, os equipamentos, mesmo os mais simples, além de permitirem a visualização quase instantânea dos espectros, possuem incorporados em seus sistemas computacionais, “poderosos” softwares que permitem os mais diferentes tipos de tratamento de dados (ALVES, 2018).

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

A seguir, apresentamos a metodologia e desdobramentos utilizados para o desenvolvimento do estudo, considerando todo percurso delineado para tal fim.

4.1 Amostragem

Para a medida dos dados, foi instalado um observatório atmosférico no Campus Porto Velho Calama na cidade de Porto Velho (8,8 ° S, 63,9 ° W) – Rondônia, em julho de 2016, que realiza medidas de sensoriamento remoto a partir da superfície, utilizando detecção de FTIR, por meio de um espectrômetro de absorção Bruker 125M FTIR, com rastreador solar e estação meteorológica.

Este equipamento chegou ao Campus Porto Velho Calama por intermédio do projeto: "*Belgian-Brazilian Network for Studying the Atmosphere Above the Amazonian Forest*", que tem o apoio financeiro do "*Belgian Science Policy Office (BELSPO) e* BIRA – IASB Coordenado pela Dra. Martine DeMazière (BIRA-IASB) e com parceria da Dra. Luciana Vanni Gatti – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Me. Carlos Augusto Bauer Aquino – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO). Este projeto tem por objetivo estabelecer uma parceria com institutos de pesquisa para implementar e manter um observatório atmosférico em Porto Velho – RO, na região Amazônica.

O Bruker 125 FTIR (Figura 21), é um espectrômetro de alta resolução em FTIR que, foi concebido para executar operações de campo e medidas atmosféricas precisas de coluna total (da superfície até o sol) de CH_4, CO, H_2CO, além de outras espécies. Estes compostos podem ser medidos tanto usando o sol como fonte ativa de IR medindo sua transmitância, como também em modo de emissão passiva.

As medidas foram realizadas seguindo o princípio do Interferômetro de Michelson, que é composto por uma fonte de luz (sol), um separador de feixes (*Beam Splitter*), dois espelhos, e um detector de luz. Um feixe de luz é emitido contra o separador, que o divide em dois feixes, cada um dirigido a um espelho, com um ângulo de 90º, em relação um ao outro. Esses feixes são, então, refletidos,

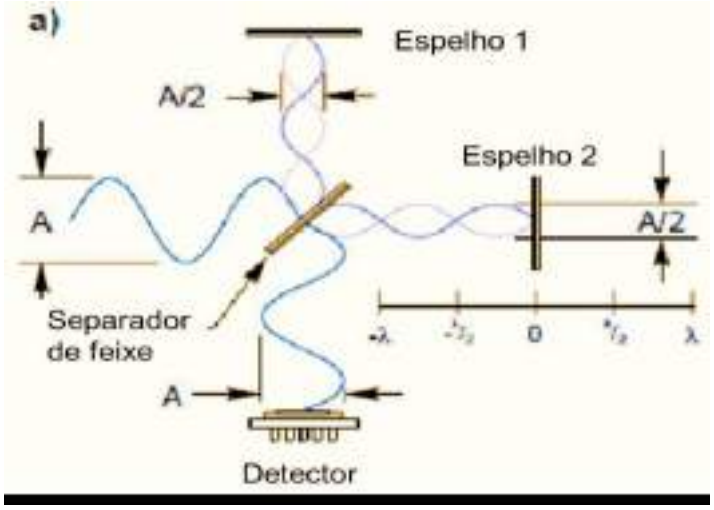
e voltam para o separador. E eles são recombinados, reproduzindo um padrão de interferência construtiva ou destrutiva, enquanto são desviados para o detector. (Figura 22).

Figura 21 - Bruker 125 FTIR Espectrômetro De Alta Resolução Em FTIR Instalado no Campus Porto Velho Calama – Porto Velho / RO.

Fonte: Arquivo do autor

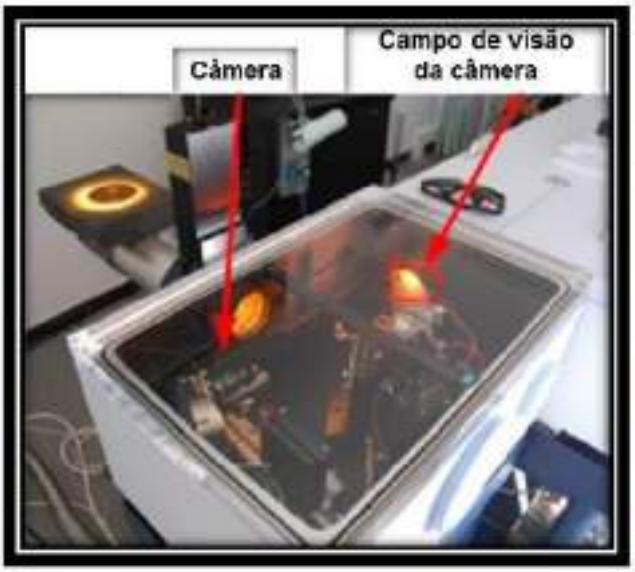
Para medições de transmitância atmosférica, a energia da radiação solar é recolhida por um sistema de rastreamento solar (*Sun Tracker*), que segue automaticamente a posição do sol (fonte de energia). Para garantir uma precisão muito elevada a imagem do sol é centralizada na abertura de entrada do espectrômetro e é registrada por uma câmera. (Figura 23)

Figura 22 - Princípio de funcionamento do Interferômetro de Michelson.



Fonte: Adaptado de Belgian Institute for Space Aeronomy.

Figura 23 - Detalhamento do caminho da luz do sol na abertura do Espectrômetro FTIR.



Fonte: Adaptado de *Belgian Institute for Space Aeronomy*.

O software de processamento de imagem (chamado *CamTracker*), calcula a posição relativa do centro do sol, em relação ao centro da abertura de entrada, e reenvia informações para os motores do rastreador, o qual segue automaticamente a posição da fonte de energia (sol), ao longo do dia. O rastreador solar pode ser observado na Figura 24. Este sistema necessita de uma estação meteorológica para evitar medidas quando está chovendo. Neste caso, o sistema fecha automaticamente a abertura de entrada da radiação solar evitando que a chuva chegue ao espectrômetro e provoque danos ao equipamento. A estação meteorológica realiza as medidas: velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, umidade do ar e radiação solar, que auxiliam no funcionamento do equipamento (Figura 25).

Figura 24 - *Solar Tracker* – Instalado No Campus Porto Velho Calama –Porto Velho / RO.

Fonte: Arquivo do autor.

Figura 25 - Estação Meteorológica – Instalada no Campus Porto Velho Calama – Porto Velho / RO.

Fonte: Arquivo do Autor.

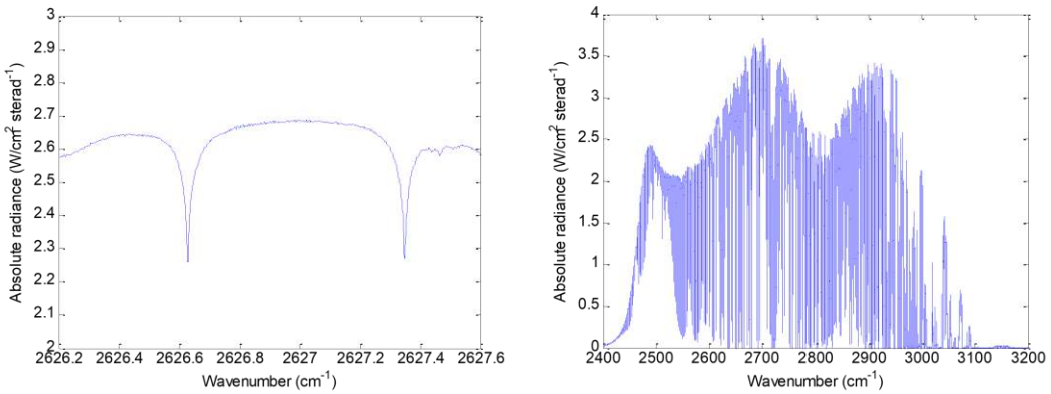
O espectrômetro é equipado com uma unidade eletrônica móvel que converte os dados analógicos para digital permitindo medições de alta resolução a partir de faixas espectrais próximas do infravermelho médio, através do infravermelho próximo, até o visível e ultravioleta.

É importante observar, no espectro do IR próximo, a superfície da linha que apresenta a quantidade total das espécies em observação. A forma da linha contém informações sobre a distribuição vertical das espécies em até 35km.

A transformada de Fourier é aplicada ao interferograma medido pelo espectrômetro (isto é, a absorção de luz para cada posição de espelho, para obter os espectros desejados (isto é, a absorção de luz para cada comprimento de onda). Isto é feito automaticamente pelo *software Bruker* OPUS.

O espectrômetro trabalha na faixa espectral a partir da região do Infravermelho Médio (450 cm $^{-1}$) até na faixa do ultravioleta (45000 cm $^{-1}$). O FTIR tem resolução espectral de 0,008 cm $^{-1}$ no infravermelho médio (MIR – *"Middle Infrared"*) e intervalos menores de comprimento de onda. E em Porto Velho, medimos espectros de 450 cm $^{-1}$ até 4300 cm $^{-1}$ (região MIR). Dependendo da espécie alvo, são utilizados diferentes filtros. A Figura 26, apresenta um exemplo de espectro medido em Porto Velho.

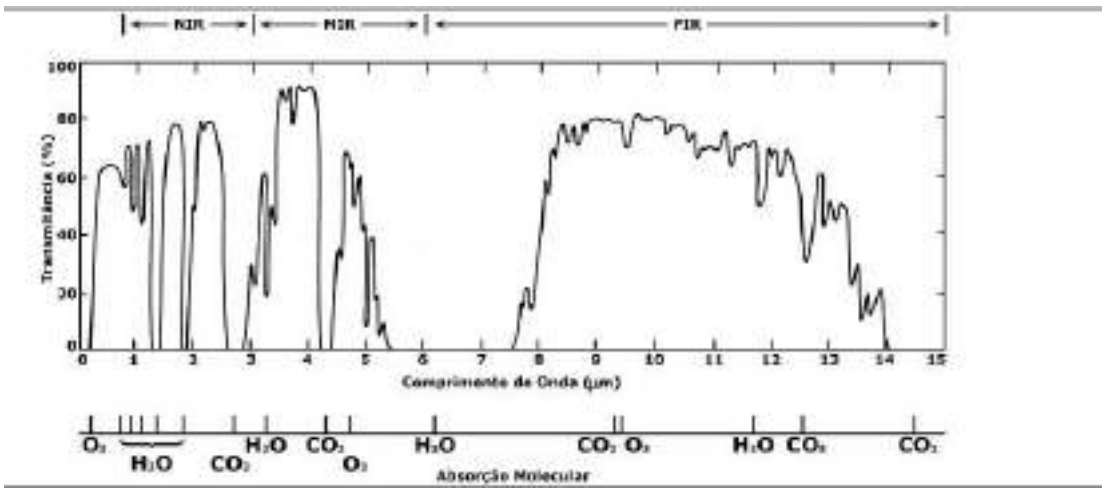
Figura 26 - a (esquerda) Espectro medido em Porto Velho no dia 18 de agosto 2016. **b** (direita): exemplo das linhas de absorção do CO_2 que podem ser utilizadas na quantificação



Fonte: Arquivo do Autor.

A Figura 27 é apresenta um espectro com as faixas características para os vários gases que podem ser detectados pelo FTIR.

Figura 27 - Espectro de transmissão da atmosfera terrestre. Corresponde a uma camada de 1830 m de ar ao nível do mar e com 40% de umidade relativa a 25ºC. Na parte de baixo da Figura estão indicadas as linhas de absorção de alguns componentes do ar atmosférico. É importante ressaltar que a Figura refere-se à uma camada de ar de quase 2km.



Fonte: Adaptado de http://www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/espectro.htm.

Para realizar a "análise de reaquisição", ou seja, para obter a quantificação dos gases nos espectros, o *software* SFIT4, o qual é amplamente utilizado pela comunidade "*InfraRed*" do NDACC (https://www2.acom.ucar.edu/irwg/links) e mais especificamente pelo grupo BIRA-IASB, foi também utilizado no FTIR, de Porto Velho. Este software consiste em:

1. Um modelo *"forward"* que simula os espectros atmosféricos levando em conta todos os parâmetros atmosféricos necessários: parâmetros das linhas espectroscópicas (posição, intensidade, efeito da pressão na largura do pico, e outros), medidas "a priori" dos perfis dos principais gases atmosféricos, com medidas a cada 6 horas, de perfil de pressão e temperatura pela estação meteorológica, análise do formato das linhas no espectro.

2. Um modelo inversão, baseado no método de Estimativa de otimização (RODGERS, 2000), no qual os perfis dos gases alvo são ajustados interativamente a fim de minimizar os resíduos entre os espectros calculado e medido. Uma vez que não há uma solução única, o método de reaquisição precisa de informações *"a priori"* (como os perfis "a priori" do alvo) e o resultado da análise é uma média ponderada entre as informações "a priori" e as medições. Para cada reaquisição, a contribuição da medição para o perfil readquirido (idealmente 1 para todas as altitudes), é dada pela faixa central do pico. Apenas a informação a priori está perto de contribuir para os perfis recuperados acima de 40 km. Os graus de liberdade para sinal *(Degrees* Of *Freedom For Signal* - DOFS), isto é, o traço da matriz da faixa média central (RODGERS, 2000), dão o número de camadas independentes de altitude que podem ser obtidas em adição a quantificação da coluna total.

Foram estudados o ciclo sazonal e a variabilidade do dia a dia obtidos, a partir da série temporal dos gases, que identificamos a partir das medidas da coluna atmosférica estudada no Bruker 125 FTIR. Utilizamos as trajetórias das massas de ar para explicar possíveis eventos de alta concentração (por exemplo, provenientes de queimadas). As medidas de CO foram utilizadas como parâmetro para determinar a influência das emissões de queima de biomassa.

Os espectros do sinal quantificados e analisados por meio da aplicação da Transformada de Fourier, que decompõem um sinal em suas componentes elementares, seno e cosseno. A transformada é expressa em termos de uma função de base sinusoidal, como soma ou integral de funções sinusoidais multiplicadas por coeficientes, as amplitudes. Esta etapa foi conduzida em parceria com o BIRA-IASB, sob coordenação da Dra. Martine De Maziere e da pesquisadora Dra. Corinne Vigouroux.

4.2 Análise dos dados

O procedimento utilizado para análise dos dados obtidos pelos diferentes equipamentos, aplicados neste trabalho, empregou um processo capaz de gerar conhecimento, a partir de dados estruturados que nomeia-se de *Knowledge Discovery in Database* (KDD) ou Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados (DCBD). Esse processo combina diversas áreas da descoberta do conhecimento, tais como Aprendizagem de Máquina, Reconhecimento de Padrões, Estatística e Inteligência Artificial, com o objetivo de extrair, de forma automática, informação útil em bases de dados. (SILVA et al 2016)

A metodologia escolhida foi a *Cross-Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM), concebida originalmente para mineração de dados. Para a CRISP-DM, o ciclo de vida do processo de DCBD, segue uma sequência de etapas (CHAPMAN et.al. 2000)

O processo foi adaptado para atender as necessidades desta pesquisa, da forma que as etapas visam atender este domínio de conhecimento, sendo o processo interativo apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Metodologia *Cross-Industry Standard Process for Data Mining*, adaptado para o processo de análise dos dados produzidos pelos diferentes equipamentos aplicados nesta pesquisa.

Fonte: Autor da tese

Assim, com os dados, dos diferentes equipamentos, fornecidos pelo usuário e, através das respostas encontradas após a aplicação da metodologia, a sequência da execução pode ser alterada. SILVA at. al. (2016), explica que o

encadeamento das ações, dependendo do objetivo e de como as informações se encontram, permite retorno a passos já realizados.

1. A “Aquisição e Compreensão dos Dados” visa a identificar informações que possam ser relevantes para o estudo e, uma primeira familiarização com seu conteúdo, descrição, qualidade e utilidade. Os dados foram coletados a partir do instrumento Bruker 125 FTIR.

2. A preparação dos dados consiste em atividades de limpeza e transformação dos dados. Ou seja, nesta fase os dados, das diferentes fontes, foram uniformizados, de forma a deixá-los comparáveis e mensuráveis entre si. E na Modelagem, foram selecionadas e aplicadas as técnicas de mineração de dados mais apropriadas aos objetivos pretendidos.

3. A Avaliação consiste na revisão dos passos seguidos, verificando se os resultados obtidos vão ao encontro dos objetivos, previamente determinados. De acordo com os resultados alcançados, na revisão do processo, decide-se pela sua continuidade ou se deverão ser efetuadas correções.

4. Os Resultados caracterizam um conjunto de relatórios, que demonstram a convergência, ou não, para os objetivos traçados, a partir detécnicas de mineração de dados aplicados ao conjunto de dados analisados e validados.

4.3 Desenvolvimento do Robô e banco de dados

A busca e armazenamento das previsões de chuva, em dados de milímetro de água e grau de certeza, das cidades do estado de Rondônia, são necessárias para a preparação dos dados e análise dos resultados.

O desenvolvimento do sistema seguiu a metodologia de desenvolvimento por prototipação, que é uma técnica válida que pode ser perfeitamente empregada, desde que o sistema a ser desenvolvido, tenha as características de possuir consultas dinâmicas, interagir fortemente com as pessoas, ou possuir um algoritmo ou processamento combinatório que necessite ser desenvolvido de forma evolucionária. A criação de um protótipo é um trabalho que deve ser feito de forma interativa e que obedece ao ciclo exposto na Figura 29 (PRESSMAN, ROGER S; MAXIM, 2016).

Como em todas as abordagens de desenvolvimento de software, a prototipação inicia-se com a coleta de requisitos. Durante essa fase, clientes e desenvolvedores ficam em constante interação, facilitando assim o levantamento de requisitos e funcionalidades do sistema. Ocorre então a elaboração de um “projeto rápido”, concentrando-se nos aspectos definidos pelo usuário. O Projeto rápido leva a construção de um protótipo que é avaliado pelo cliente/usuário e, é usado para refinar os requisitos. A Prototipação é um paradigma eficiente da Engenharia de Software. O protótipo foi construído a fim de servir como base para definição de requisitos. Ele será depois descartado - pelo menos em parte - e o software real será projetado, levando-se em consideração a qualidade e a manutenibilidade (PRESSMAN & MAXIM, 2016).

Foi construído em colaboração com o grupo de pesquisa GoTech (sediado no campus Porto Velho Calama - IFRO), um Robô de busca de dados de previsão de chuva e chuva efetiva, para o período de 28 de agosto a 03 de setembro de 2020, para que pudéssemos comparar com o mesmo período (transição entre seca e chuva) de 2016, para serrem correlacionados com os dados de chuva efetiva no mesmo período. Vale ressaltar que a estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na cidade de Porto Velho, está desativada, logo, o funcionamento deste software contribuiu, não só com este trabalho, mas também pode ser utilizado como fonte de dados desta região, para futuros trabalhos, uma vez que o site é de domínio público.

Os resultados obtidos pelo Robô de busca de dados de previsão de chuva utilizando técnicas de inteligência artificial traz, até o momento, as seguintes informações:

- Levantamento dos dados
- Análise da estrutura do site
- Modelagem do banco de dados
- Processamento dos dados

Figura 29 - Modelo de prototipação.

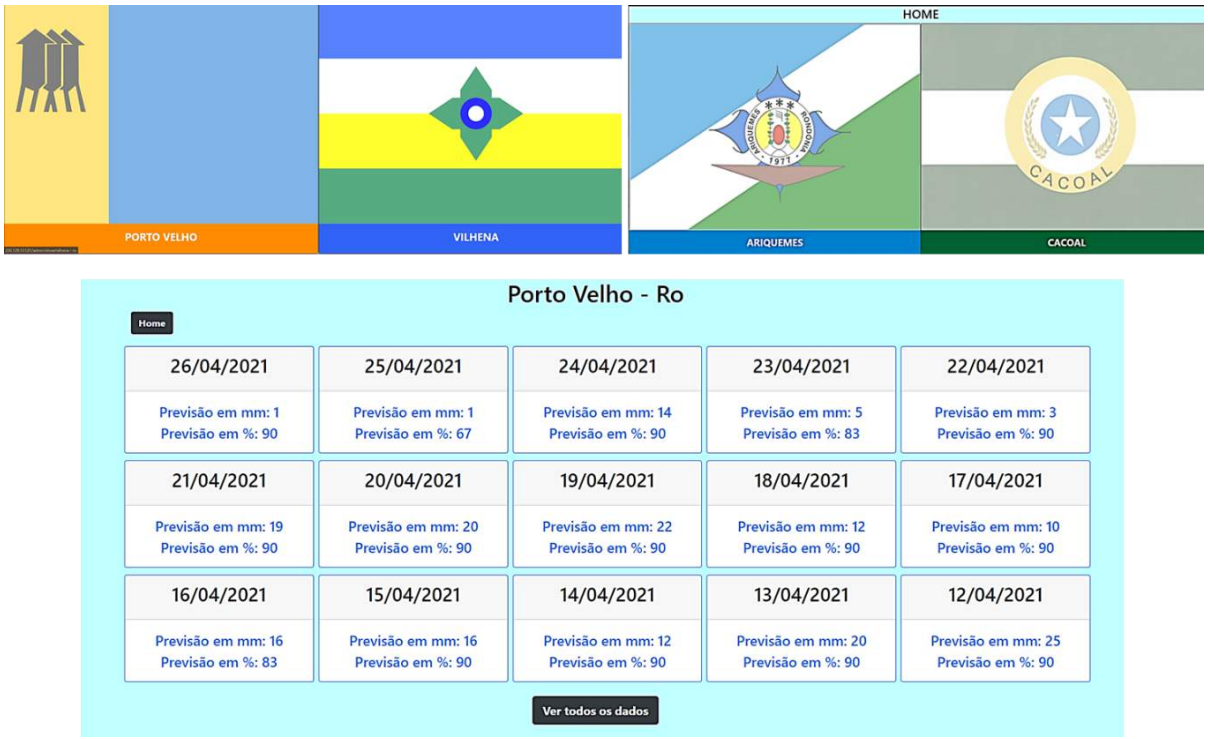
Fonte: Adaptado de (Pressman, Roger S; Maxim, 2016).

Os resultados podem ser vistos no site:

https://amazonrain.portovelhocalama.ifro.edu.br.

A Figura (30) apresenta uma das Imagens apresentadas no site, onde são identificadas as cidades em que são realizados os levantamentos de dados pelo robô de busca de dados de previsão de chuva. Também é possível ver como se apresenta as informações de previsão de chuva para a cidade de Porto Velho, como exemplo, na parte inferior da Figura. Ao clicar em cada bandeira (municipal), as informações se alteram para o município selecionado. Outras abas vão mostrar informações sobre a evolução das previsões a partir das taxas para todos os municípios estudas

Figura 30 - Os resultados obtidos pelo Robô de busca de dados de previsão de chuva para a cidade de Porto Velho Rondônia - 2021.



Fonte: **Adaptado do site** https://amazonrain.portovelhocalama.ifro.edu.br

4.4 Satélites TRMM, GPM e CHIRPS

Os satélites utilizados para obtenção dos dados, aplicado pelo software (robô), relacionados a previsão e quantidade pluviométrica no decorrer da pesquisa, foram o *Tropical Rainfall Measuring Mission* – TRMM e em seguida o *Global Precipitation Measurement* – GPM.

Analisamos também, a possibilidade de uso de outro sistema que produz informações semelhantes, o *Hazards Group InfraRed Precipitation with Station* data – CHIRPS.

O TRMM foi criado através de uma parceria entre a NASA e a Agência Japonesa de Exploração Espacial (JAXA). Foi lançado no mês de novembro de 1997. Seu objetivo era monitoramento e estudo de nuvens, precipitação e outros aspectos do ciclo da água entre as coordenadas 35° de latitude norte e 35° sul, fazendo 16 orbitas por dia, nos trópicos. O TRMM, inicialmente tinha uma orbita polar baixa, 350 km e a partir de 2001 passou para 403 km, juntamente com um

curto período de translação de 91 min, o que permite uma alta resolução espacial e temporal das imagens (NASA, 2015).

Após 17 anos de atividade, em 2015, o TRMM iniciou sua fase de desativação. O projeto TRMM foi substituído, em fevereiro de 2014, pelo GPM.

Para dar continuidade na coleta dos dados relativos à precipitação, utilizamos o satélite GPM que, é uma missão conjunta entre a JAXA e a NASA, bem como outras agências espaciais internacionais, para realizar frequentes observações da precipitação na Terra, onde é função do satélite fornecer observações sobre as próximas previsões/observações de chuva e neve no mundo todo a cada três horas.

O algoritmo usado pela equipe do GPM nos EUA o *Integrated Multi-satellitE Retrivals* – IMERG, que tem como objetivo Inter calibrar, fundir e interpolar todas as estimativas de precipitação de micro-ondas passivos de satélite (PMW – Passive microwave), juntamente com avaliações de satélite IR calibrado por micro-ondas. Para os cálculos o GPM utiliza a versão 2017 do *Goddart Profiling Algorithm* (GPROF 2017), que usa quadrantes de 0,1° x 0,1°, Inter calibrados para instrumentos GPM e combinadas para ações em etapas de meia hora. (NASA, 2017).

O satélite TRMM e o observatório GPM servem, tanto como uma ferramenta de calibração, quanto avaliação para todos os produtos de precipitação baseados em PMW e IR, integrados no IMERG em seus respectivos períodos, uma vez que eles fornecem combinações com todos os leo-satélites (satélites em órbita baixa) equipados em PMW e geossatelites com IR. (NASA,2019).

Um sistema que produz informações semelhantes é o *Hazards Group InfraRed Precipitation with Station* data – CHIRPS, que dá estimativas de precipitação a partir de pluviômetro e observações de satélite. Foi criado no Centro de Observação e Ciência de Recursos Terrestres (EROS - Earth *Resources Observation and Science*), com apoio da USAID, NASA e NOAA.

O CHIRPS utiliza um conjunto de dados de precipitação quase global, abrangendo uma posição entre 50° sul e 50° norte, em todas as longitudes. E baseia-se em abordagens de técnicas de interpolação "inteligentes" e alta resolução, longo período de estimativas de precipitação de registro, com base em observações infravermelhas da Nuvem Fria, *Cold Cloud Duration* (CCD). O sistema utiliza um algoritmo construído em torno de uma resolução climatológicas de 0,05°,

que agrupa informações de satélite para representar locais medidos em muitas direções. As medidas são feitas mensalmente e diariamente desde 1981, combina dados de estação pluviométricas *in-sito,* que vão gerar series temporais de chuva para análise de tendências e monitoramento de seca sazonais. (Funk, C. 2015)

Os resultados são estimativas para informações preliminares um tempo de resposta de cerca de 2 dias e um produto final com uma média, de cerca de 3 semanas. O algoritmo CHIRPS apresenta, resultados da validação global e regional que podem ser usados para quantificar os impactos hidrológicos da diminuição da precipitação e do aumento da temperatura do ar. (FUNK, C. 2015)

Assim, após estudos e observações decidimos pela aplicação do IMERG, que utiliza dados fornecidos por instrumentos instalados em satélites, com diferentes orbitas e posições. O que leva a entender que a sua aplicação é mais eficiente aos dados que estamos trabalhando, pois, o CHIRP necessita de informações pluviométricas (*in-sito*), que ainda não estão disponíveis em nossa área de estudo. Mas estabelece uma possibilidade para um trabalho futuro em que poderemos comparar resultados entre as duas técnicas de análise.

4.5 Construção dos Algoritmos para análise dos dados

Um modelo de Classificação de dados visa realizar uma previsão com base em ocorrências passadas. Não basta apenas contar a quantidade de acertos que seu modelo teve para dizer se ele é bom ou não. Métricas diferentes (acurácia, sensibilidade e precisão) devem ser utilizadas para avaliar (MARIANO 2021)

Relacionamos as emissões (concentrações) dos gases: CO, CH_4, N_2O, C_2H_2, C_2H_6, H_2CO e HCN, com a previsão de chuva e verificamos a correlação existente com a chuva efetiva. Foram executadas três relações:

1ª – CO, CH_4 e N_2O

2ª – C_2H_2, C_2H_6, H_2CO e HCN

3ª – CH_4, N_2O, C_2H_6 e H_2CO

Para construção do algoritmo, que analisou as variáveis: previsão de chuva, chuva efetiva e concentração de gases, trabalhamos no período de agosto e setembro de 2016 e 2017, podendo expandir para 2018 e 2019. Para as concentrações dos gases, utilizamos valores entre 7 e 16 km, por entendermos que é nessa altitude que ocorre a formação de nuvens.

Usamos uma latência de 3 dias, a cada três dias de emissões observamos a reação no próximo dia. Para atingir ao objetivo e comparar os resultados utilizamos as seguintes ações:

a) Exportar os dados dos arquivos HDF5, onde estão armazenadas as concentrações dos gases coletados a partir do instrumento Bruker 125M FTIR.

b) Construir algoritmo utilizando técnicas de Regressão Logística (LR), para determinar se no dia **X** iria chover ou não, com um input de 3 e 4 gases, utilizando a base de dados de previsão de chuva e chuva coletada pelo satélite.

c) Construir algoritmo técnica da técnica de *Support Vector Machine* (SVM), para determinar se no dia **X** iria chover ou não, com um input de 3 e 4 gases, utilizando a base de dados de previsão de chuva e chuva coletada pelo satélite.

d) Construir algoritmo utilizando a técnica da técnica de *Naive-Bayes* (NB), para determinar se no dia X iria chover ou não, com um input de 3 gases, utilizando a base de dados de previsão de chuva e chuva coletada pelo satélite;

Todos os algoritmos, que foram construídos utilizando a linguagem Python, e entregam as estatísticas de acurácia e precisão.

A Figura 31, apresenta um quadro onde são apresentadas as técnicas de extração, tratamento e análise exploratória das variáveis estudadas.

Descrição dos termos apresentados no diagrama da Figura 31:

- ***Extract Transform Load* (ETL)**: processo de integração de dados que consiste em extrair os dados de uma fonte, transformá-los em um formato analisável e carregá-los em um banco de dados.
- **Análise Exploratória de Dados:** processo em que se fazem análises estatísticas para a extração e visualização das principais características do conjunto de dados, como média, mediana, tipo de distribuição, comportamento ao longo do tempo, etc.
- **Limpeza de Dados:** processo de remoção ou alteração dos dados, caso haja características que corrompem as informações contidas nos dados.
- ***Machine Learning* (Aprendizado de Máquina):** conjunto de técnicas e ferramentas para que computadores e outras máquinas autônomas possam identificar padrões de comportamento através de conjunto de dados e a partir disso, realizar ações autônomas, preditas com base nesses dados.

- **Regressão Linear:** métodos estatísticos pelo qual a relação entre os dados utilizados para realizar uma previsão e o resultado predito em si pode ser descrito a partir de uma equação polinomial linear.
- ***Support Vector Machine* (SVM):** processo estatístico que consiste em encontrar um hiperplano em um espaço N-dimensional (N – o número de recursos, que classifique distintamente os pontos de dados, sendo ideal que os dados estejam os mais distantes possíveis para serem classificados o mais corretamente possível.
- ***Nave Bayes***: método estatístico que, pressupondo a independência entre as variáveis, realiza uma classificação probabilística de observações, caracterizando-as em classes pré-definidas. É uma aplicação prática do Teorema de Bayes.
- **Validação Métrica**: conjunto de recursos utilizados para garantir que os valores preditos sejam os mais próximos possíveis da realidade. Dentre alguns destes recursos podemos destacar:

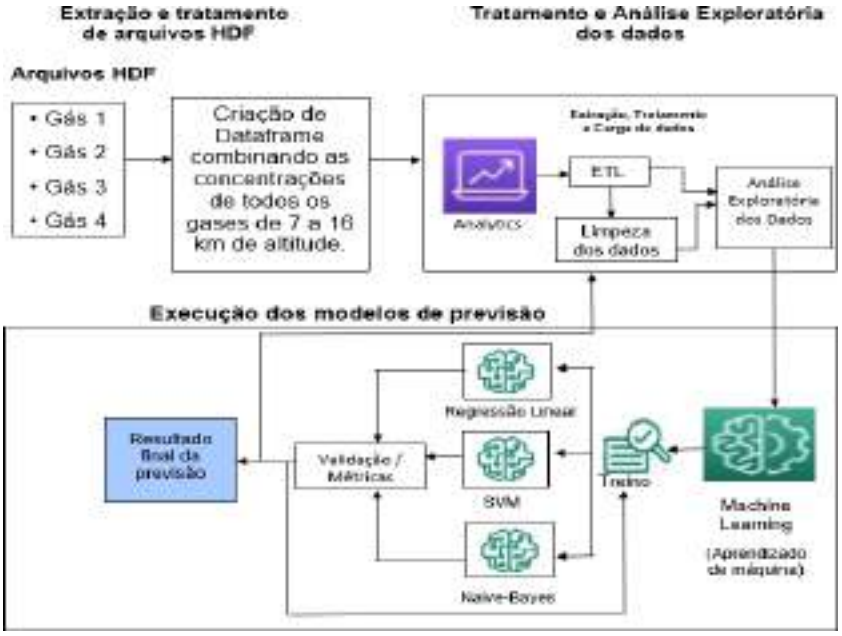
- Acurácia: que avalia o percentual de acertos, ou seja, ela pode ser obtida pela razão entre a quantidade de acertos e o total de predições.

- Sensibilidade: avalia a capacidade do método de detectar com sucesso resultados classificados como positivos.

- Precisão: avalia a quantidade de verdadeiros positivos sobre a soma de todos os valores positivos.

Os resultados encontrados após a aplicação do algoritmo de análise das variáveis envolvidas neste trabalho, utilizam parâmetros probabilísticos, taxas que medem probabilidades de ocorrências, tais parâmetros confirmam os valores de acurácia que vão definir a melhor a análise dos resultados.

Figura 31 - O quadro apresenta o organograma que descreve do tratamento, preparação e análise das variáveis estudadas.



Fonte: **Autor da tese.**

Os resultados encontrados após a aplicação do algoritmo de análise das variáveis envolvidas neste trabalho, utilizaram parâmetros probabilísticos, taxas que medem probabilidades de ocorrências, tais parâmetros confirmam os valores de acurácia que vão definir a melhor a análise dos resultados.

De acordo com David R.M et. al. (2022) a descrição e aplicação das taxas probabilísticas apresentam-se:

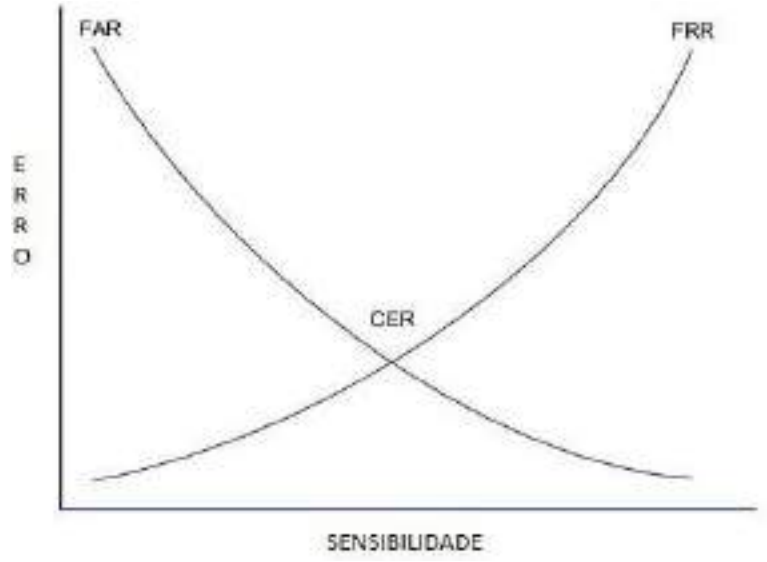
***False Acceptance Rate* (FAR):** é chamada de Taxa de Fraude ou Taxa de Falsa correspondência ou erro Tipo 2. É uma taxa de falsa aceitação, identifica-se o falso/verdadeiro. Resultado falso, mas o sistema entende como verdadeiro. Exemplo: não ia chover, mas choveu. Para um sistema de autenticação seja mais bem sucedido, essa medida deve ser minimizada.

***False Rejection Rate* (FRR):** também é chamado de Taxa de não Correspondência Falsa ou Erro tipo 1. É uma medida de probabilidade que identifica uma taxa de rejeição falsa. É o contrário do FAR. O verdadeiro que é falso. Exemplo: choveu, mas o sistema identificou como falso, não choveu. Ele é representado como a percentagem de vezes que uma situação é rejeitada incorretamente pelo sistema. Para que um sistema seja mais bem sucedido, essa medida deve ser minimizada.

***Equal Error Rate* (ERR):** É o ponto de equilíbrio. Taxa de equilíbrio entre FAR e FRR. Representa a precisão geral do sistema. Quanto menor o valor de ERR, maior a precisão do sistema. Os valores de ERR são determinados pelo ponto em que FAR e FRR são iguais em valor. Também é chamado de *Crossover Error Rate* (CER).

O gráfico apresentado na Figura 32 mostra como o FAR e o FRR se impactam. O FRR é inversamente proporcional a FAR e vice-versa. Essa relação pode ser gerenciada por um parâmetro chamado limiar de confiança (também chamado de sensibilidade). O CER é o ponto onde as linhas FAR e a Linha FRR se cruzam (são iguais) no gráfico que fornece a precisão geral em um sistema (CONRAD E. et. al. 2017).

Figura 32 - Representação entre FAR versus FRR e intersecção para identificar a precisão do sistema CER.



Fonte: Adaptado de Conrad E. et. al. 2017

5 RESULTADOS

Apresenta, a seguir, a análise interpretativa dos dados produzidos por meio do Bruker 125M FTIR. Foram feitas medidas de diversos gases que têm um importante papel na química e física da atmosfera sobre a região Amazônica. As variáveis: Previsão, Probabilidade e Chuva efetiva, foram utilizadas na análise dos resultados no mesmo período em que as concentrações dos gases foram medidas e analisadas.

5.1 Concentração dos Gases Medidos no FTIR

Os gases escolhidos para compor a análise, que procura atender ao objetivo deste trabalho foram: CO, CH_4, CH_3OH, N_2O, O_3 e H_2CO; por exercerem aspecto reativo na atmosfera.

A escolha também se baseou na atividade dos gases na atmosfera, por exemplo, O H_2CO, que é um gás comum presente na oxidação atmosférica, com curto tempo de vida, porém é um ótimo traçador de VOCs, pois se apresenta por fontes de emissões diretas, antropogênica e pirogênica. O CO é um traçador de queimadas. O CH_4 é considerado o segundo gás mais importante entre os GEE. Tem uma estimativa de vida curta na atmosfera de 9 a 20 anos (cerca de 12) e, é um GEE que absorve uma expressiva quantidade de energia enquanto está presente na atmosfera (STOCKER et. al. 2013, IPCC 2014 e SCHIERMEIER, 2020).

Outros gases podem ser utilizados, como C_2H_6, HCN, C_2H_2 e Sulfeto de Carbonila (OCS), identifica-se a necessidade de testar novas possibilidades de avaliação das reações proporcionadas por eles.

As concentrações foram medidas na coluna total nas alturas entre 0,24 km e 97 km, durante o ano de 2016 e 2019. Para construção da ferramenta de análise foi utilizado o período de 15 de julho de 2016 até 21 de julho de 2017, período de transição entre estação seca e estação chuvosa, perfazendo um total de 70 dias de observação em 2016 e 21 dias em 2017.

Para otimizar as análises, as medidas foram trabalhadas nas altitudes entre 0,24 km e 20 km. Onde se localiza a Troposfera, camada mais próxima da superfície terrestre.

Utilizamos como exemplo o CH_4 para apresentar as medidas da fração molar dos gases para representar as concentrações molares da coluna de ar seco a partir da fórmula:

$$xCH_4 = \frac{TC_{CH_4}}{TC_{\text{ar seco}}} \quad \text{e} \quad TC_{\text{ar seco}} = \frac{P_s}{g m_{\text{ar seco}}} - TC_{H_2}\left(\frac{m_{H_2O}}{m_{\text{ar seco}}}\right)$$

Onde:

TC - Representa a coluna total;

P_s - Pressão na superfície;

g - Aceleração da gravidade;

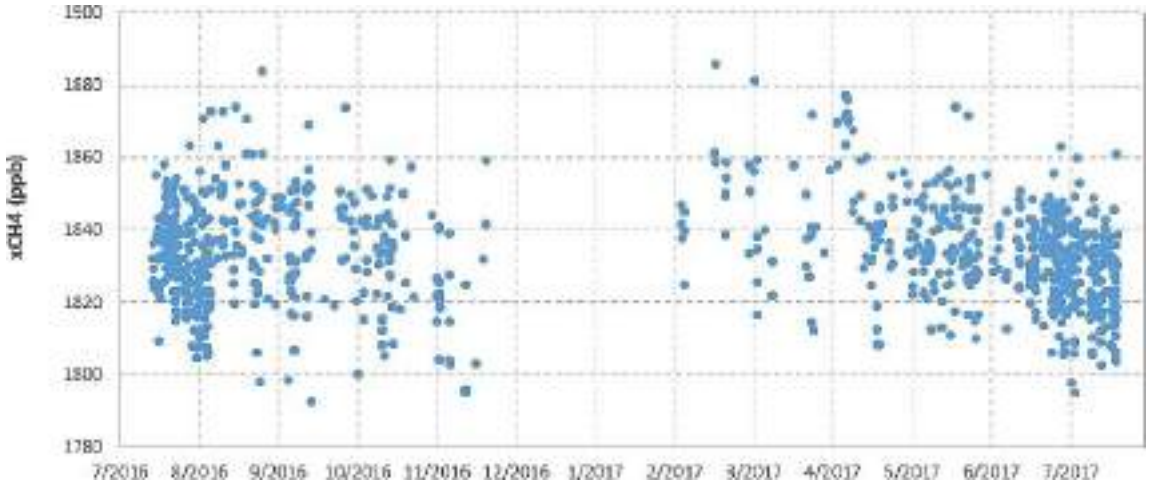
$m_{\text{ar seco}}$ - Massa molar do ar seco; e

m_{H2O} - Massa molar da água.

A Figura 33 apresenta, a média da fração molar da coluna de ar seco, na série temporal de medidas da coluna total de CH_4, feitas no período de julho de 2016 a julho de 2017, onde observa-se uma maior concentração de medidas durante a estação seca, de julho a agosto de 2016, e junho a julho de 2017. Não foram encontradas medidas nos meses de: dezembro (2016) e janeiro (2017), em função do período chuvoso. As concentrações no período de estudo ficaram entre os valores de 1820 ppb e 1860 ppb (Os resultados das concentrações de CH_4 são utilizadas para a avaliação após aplicação da ferramenta (algoritmo) que irá comparar as estimativas de precipitação com as emissões dos gases escolhidos para análise.

Em seu estudo sobre CH_4, MORAIS (2020), que trabalhou com os dados no mesmo período e local desse estudo, encontrou-se uma taxa de crescimento das concentrações locais de 5,7 ppb/ano, que se apresentou menor que a taxa média global de 7,7 ppb/ano.

Figura 33 - Série temporal das concentrações de xCH_4 da coluna total (Troposfera) no período de julho de 2016 a julho de 2017 realizadas pelo Bruker 125M FTIR em Porto Velho Rondônia.



Fonte: Adaptado de Morais (2020)

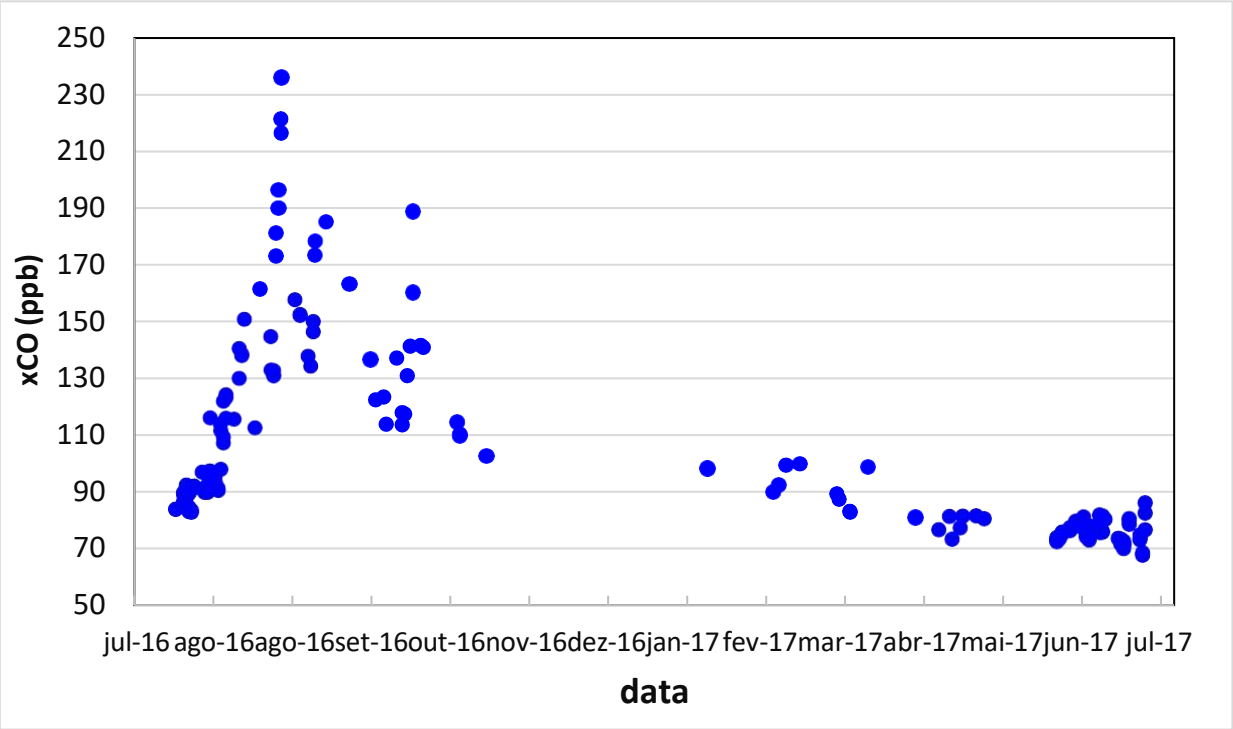
Outro gás participante das reações atmosféricas de interesse ambiental é o CO, a Figura 34, apresenta a série temporal das concentrações do gás, medidas no mesmo período que foi medido o CH_4.

A Figura 34, mostra as concentrações de xCO, que também apresenta a média da fração molar da coluna de ar seco, no período de julho de 2016 a julho de 2017. Observa-se que os maiores picos de concentrações estão entre os meses de agosto e setembro de 2016, onde há aumento de ações antrópicas e maior número de focos de queimadas, diminuindo a partir do mês de outubro as concentrações no período de transição da estação seca para a estação chuvosa.

O INPE apresenta os seguintes números para focos de queimadas no Bioma Amazônico, no período estudado:

- Agosto: 2016 – 17.724 focos; e 2017 – 21.254 focos
- Setembro: 2016 – 21.339 focos; e 2017 – 36.577 focos
- Outubro: 2016 – 13.404 focos; e 201 – 14.465

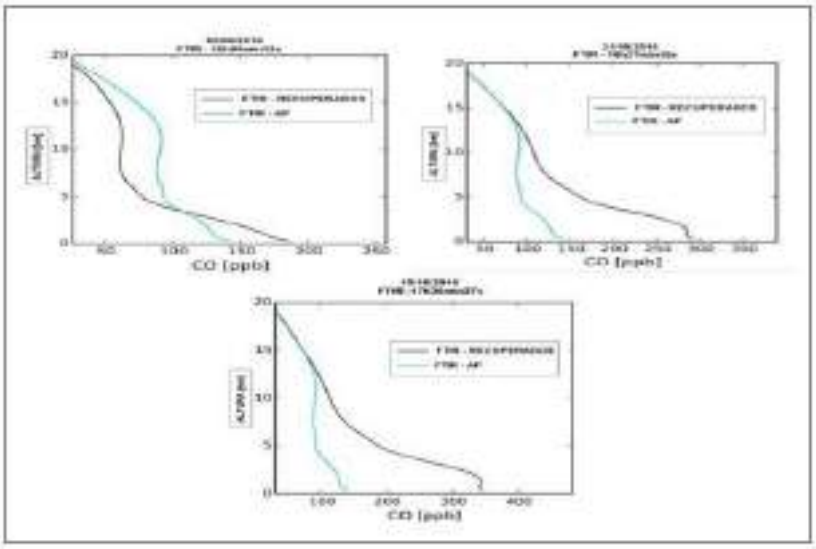
FIGURA 34 - Série temporal das concentrações de xCO no período de 2016 a 2017 medidas por coluna total de FTIR.



Fonte: autor da tese

É importante salientar que o CO é um traçador de queimadas, um aumento nos valores de suas concentrações possibilita identificar o aumento das ações antrópicas na região, como mostra a Figura 35. Sua concentração ficou entre valores de 100 ppb e 140 ppb, enquanto os valores da coluna total (xCO) estiveram em torno de 150 ppb e 200 ppb, chegando próximo dos 250 ppb no mês de agosto (2016). O que mostra a proximidade entre os valores da coluna total e a faixa em estudo.

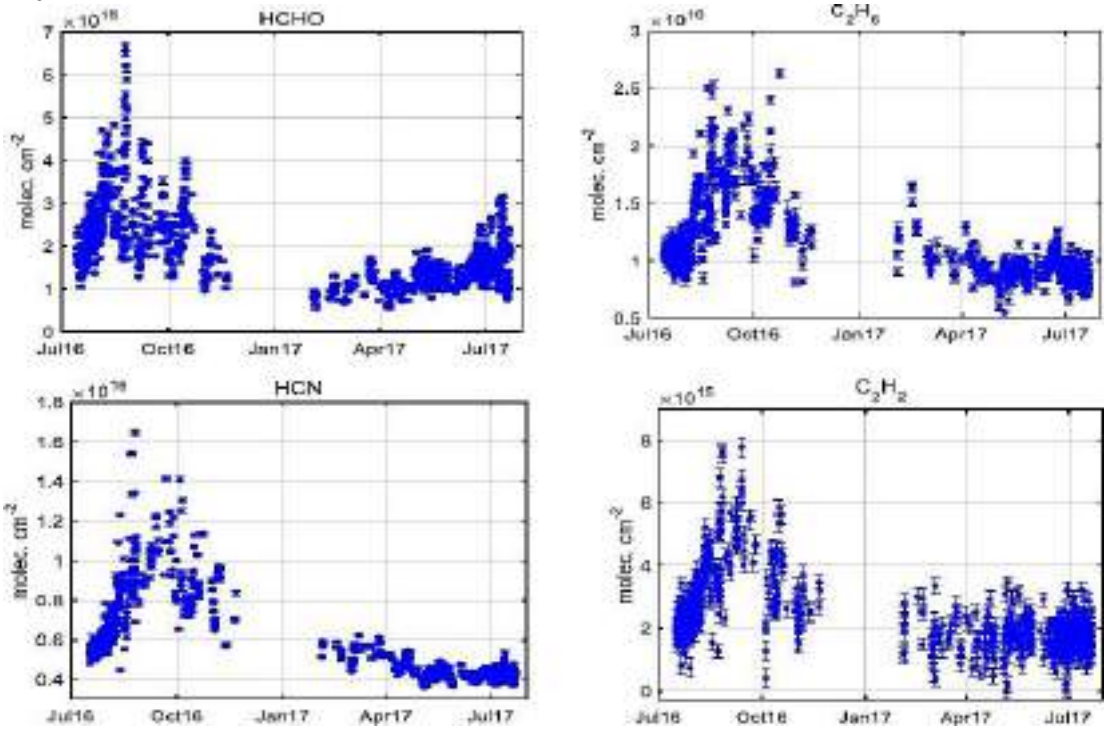
FIGURA 35 – Concentrações de CO, recuperadas (medidas analisadas no local) e medias a priori (padrão de referência) nos meses de agosto, setembro e outubro de 2016 em Porto Velho/RO, utilizando o Bruker 125M FTIR.



Fonte: autor da tese

Outros gases importantes, que poderão ser utilizados para análise da evolução das concentrações de gases da química da atmosfera e possíveis contribuições climáticas, são apresentados na Figura 36.

FIGURA 36 - Série temporal total da coluna de HCHO, C_2H_6, HCN e C_2H_2 em Porto Velho para o período de julho de 2016 a julho de 2017, a partir de dados FTIR. As barras de erro correspondem aqui apenas às incertezas aleatórias, para destacar a precisão de nossas medições.



Fonte: Adaptado do Relatório IKARE (2019)

Para os quatro gases observados na Figura 36 (HCHO, C_2H_6, HCN e C_2H_2), as maiores concentrações ocorrem durante a estação de seca, atingindo seus maiores valores entre os meses de junho e julho, diminuindo a partir de outubro, onde se inicia o período da estação chuvosa.

5.2 Análise de Variáveis Climáticas

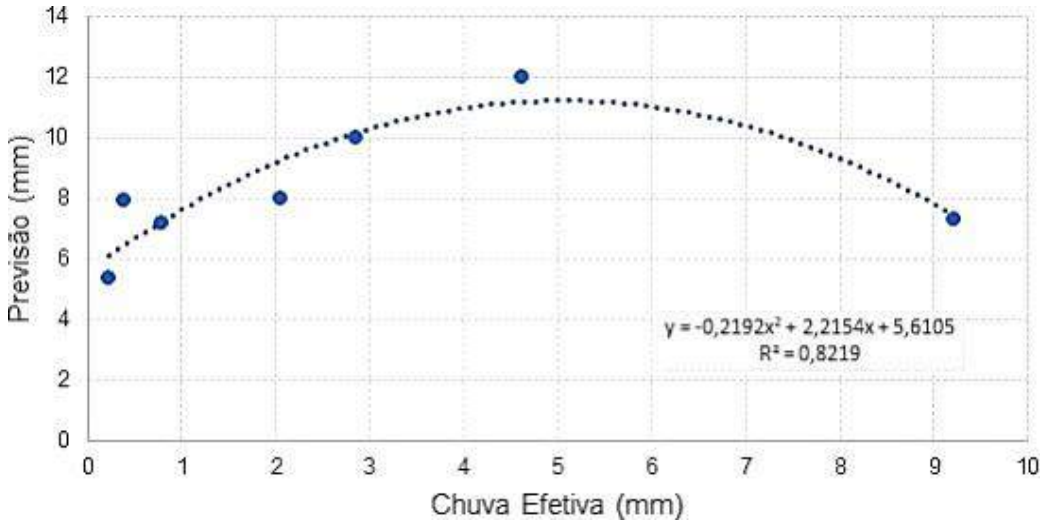
Outras variáveis medidas, que foram utilizadas para análise dos resultados foram: Previsão, Probabilidade e Chuva efetiva. Os valores analisados correspondem ao mesmo período em que as concentrações dos gases foram medidas pelo Bruker 125M FTIR.

Como não encontramos registros, em sites especializados e publicações, das variáveis: Probabilidade de chuva e volume (mm), para o período de estudo (2016 e 2017); foi necessário criar um banco de dados com as informações, dessas variáveis a partir de 2020. Assim, de posse desses dados, correlacionamos os valores de Previsão de chuva (a partir de 2020), com os dados de chuva no período de estudo.

Esse modelo relaciona as variáveis: previsão x probabilidade x chuva efetiva x concentração de gases no mesmo período, para identificar se existe influência entre concentrações e volume de chuva. O levantamento de dados das variáveis acima, estão descritos no item 4.3 e 4.4, desse trabalho.

A Figura 37 apresenta a correlação entre previsão de chuva e chuva efetiva, durante o período de estudo que compreende os dias 28 de agosto a 03 de setembro de 2020. Estas datas foram escolhidas por indicarem o período de transição entre estação seca e estação chuvosa. Também é possível observar grande grau de confiança entre os dados de previsão e os dados de chuva efetiva. O que leva a entender que é possível utilizar as previsões e probabilidades obtidos no período de 2020 para o mesmo período de 2016.

Figura 37 - Correlação entre dados de Previsão de Chuva e Chuva Efetiva, entre os dias 28 de agosto a 03 de setembro de 2020 e o mesmo período para 2016 em Porto Velho – RO.



Fonte: Autor da tese

A correlação obtida no período estudado de 2020, permitiu relacionar as variáveis de previsão e probabilidade de chuva para o período de estudo em 2016. Permitindo identificar as ações que levam a estabelecer parâmetros de estudos para atender aos objetivos traçados.

A equação foi testada para o mesmo período de estudo em 2016, e os valores obtidos para as previsões de chuva e chuva efetiva da época em estudo, correspondem ao percentual de correlação e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados do teste de comparação, para previsão e chuva efetiva para o período de 28 de agosto a 03 de setembro para os anos de 2020 e 2016 em Porto Velho – RO.

Data	Previsão(mm)	Chuva efetiva(mm)
28/08/2020	10,14096898	2,846928496
28/08/2016	6,592481616	0,464610831
29/08/2020	9,246781637	2,062099925
29/08/2016	6,425204448	0,382199322
30/08/2020	7,20799548	0,781518732
30/08/2016	11,05696515	4,222956998
31/08/2020	11,16759473	4,623377563
31/08/2016	6,524091213	0,430739761
01/09/2020	6,445748238	0,39224203
01/09/2016	8,965697185	1,854930726
02/09/2020	7,408108114	9,217009082
02/09/2016	10,40309248	3,136975297
03/09/2020	6,106551559	0,229104032
03/09/2016	10,09173895	2,796608362

Fonte: Autor da tese.

Todas essas variáveis serviram para alimentar o sistema de análise, que permitiu observar a relação entre as concentrações dos gases e as variáveis climáticas em análise. Entende-se que existe uma relação entre elas, relacionadas a concentração de gases x chuva.

5.3 Relação entre as variáveis climáticas e as concentrações dos gases estudados

As variáveis climáticas (previsão de chuva e chuva efetiva) e as concentrações dos gases foram necessárias para alimentar os modelos e atender a metodologia escolhida, que observou as relações entre concentrações dos gases e quantidade de chuva. Permitindo assim, estudar se a concentração de determinado gás tem poder de influenciar na probabilidade de chuva ou seca. Com os resultados, que serão apresentados a seguir, entendemos que a influência tem grande possibilidade de existir. Cito como exemplo o CH_4, que tem uma sazonalidade nas concentrações, onde as estações de seca e chuva, são definidas pelas concentrações menores e maiores respectivamente (BASSO 2014).

Foi trabalhado o período de transição entre seca e chuva, e observando o comportamento das concentrações dos gases nesse período. Assim, após a aplicação dos algoritmos criados para relacionar as emissões dos gases no período em estudo e a previsão de chuva e chuva efetiva, foram encontrados os resultados apresentados nas Tabelas 5 a 12 após a execução da modelagem para técnica de *Machine Learning* (Aprendizado de Máquina).

As seguintes Tabelas, apresentam os resultados do sistema (algoritmos) criado para relacionar as variáveis em estudo e que foram apresentados no tópico 4.5 e na Figura 31, que apresenta o organograma que descreve do tratamento, preparação e análise das variáveis estudadas.

Trabalhamos com os seguintes grupos de gases:

1° Com três gases: Dois GEE: CH_4, N_2O e CO (traçador de queimadas.)

2° Com quatro gases (VOCs): C_2H_2, C_2H_6, H_2CO e HCN.

3° Com quatro gases. Dois GEE: CH_4 e N_2O e dois VOCs: C_2H_6 e H_2CO.

Usamos 90, 60 e 30 dias para treino e 3 dias para previsão e a altitude entre 7 e 16 Km. Para a modelagem de cada um dos três grupos de gases.

As Tabelas: 5, 6 e 7 apresentam os resultados para primeira rodada onde utilizamos 90 dias para treino, 3 dias para previsão e a altitude entre 7 e 16 km.

Tabela 5 - Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (1), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, CO e N_2O e as variáveis climáticas em análise com 90 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km.

Algoritmo	FAR	FRR	ERR	Acurácia
LR	1,000	0,068	0,534	0,771
NB	1,000	0,034	0,517	0,800
SVM	**1,000**	**0,000**	**0,500**	**0,800**

Fonte: autor da tese

Tabela 6 - Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (1), composta pelas concentrações dos gases: C_2H_2, C_2H_6, H_2CO e HCN e as variáveis climáticas em análise com 90 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km.

Algoritmo	FAR	FRR	ERR	Acurácia
LR	1,000	0,645	0,532	0,783
NB	0,666	0,322	0,494	0,621
SVM	**1,000**	**0,000**	**0,500**	**0,837**

Font

Tabela 7 - Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (1), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, N_2O, C_2CO e C_2H_6 e as variáveis climáticas em análise com 90 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km.

Algoritmo	FAR	FRR	ERR	Acurácia
LR	1,000	0,080	0,540	0,741
NB	1,000	0,040	0,520	0,774
SVM	**1,000**	**0,000**	**0,500**	**0,806**

Fonte: autor da tese

Na Rodada (1) do sistema, os melhores valores para Acurácia foram dados pelo modelo (algoritmo) SVM, que apresentou o melhor valor para ERR em todos os grupos de gases testados.

As Tabelas: 8, 9 e 10 apresentam os resultados para segunda rodada onde utilizamos 60 dias para treino, 3 dias para previsão e a altitude entre 7 e 16 km.

Tabela 8 - Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (2), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, CO e N_2O e as variáveis climáticas em análise com 60 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km.

Algoritmo	FAR	FRR	ERR	Acurácia
LR	1,000	0,000	0,500	0,828
NB	**0,833**	**0,000**	**0,416**	**0,857**
SVM	1,000	0,000	0,500	0,828

Fonte: **autor da tese**

Tabela 9 - Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (2), composta pelas concentrações dos gases: C_2H_2, C_2H_6, H_2CO e HCN e as variáveis climáticas em análise com 60 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km.

Algoritmo	FAR	FRR	ERR	Acurácia
LR	1,000	0,128	0,564	0,729
NB	**0,833**	**0,000**	**0,416**	**0,864**
SVM	1,000	0,000	0,500	0,837

Fonte: **autor da tese**

Tabela 10 - Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (2), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, N_2O, C_2CO e C_2H_6 e as variáveis climáticas em análise com 60 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km.

Algoritmo	FAR	FRR	ERR	Acurácia
LR	1,000	0,160	0,580	0,677
NB	**1,000**	**0,080**	**0,540**	**0,741**
SVM	0,600	0,160	0,413	0,741

Fonte: **autor da tese**

Na Rodada (2) do sistema, os melhores valores para Acurácia foram dados pelo modelo (algoritmo) NB, que apresentou o melhor valor para ERR em todos os grupos de gases testados.

As Tabelas: 11, 12 e 13 apresentam os resultados para terceira rodada onde utilizamos 30 dias para treino, 3 dias para previsão e a altitude entre 7 e 16 km.

Tabela 11 - Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (3), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, CO e N_2O e as variáveis climáticas em análise com 30 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre7 e 16 km.

Algoritmo	FAR	FRR	ERR	Acurácia
LR	1,000	0,034	0,517	0,800
NB	**0,833**	**0,034**	**0,483**	**0,828**
SVM	1,000	0,034	0,517	0,800

Fonte: **autor da tese**

Tabela 12 - Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (2), composta pelas concentrações dos gases: C_2H_2, C_2H_6, H_2CO e HCN e as variáveis climáticas em análise com 30 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km.

Algoritmo	FAR	FRR	ERR	Acurácia
LR	0,833	0,161	0,497	0,729
NB	**0,833**	**0,000**	**0,416**	**0,864**
SVM	0,666	0,193	0,430	0,729

Fonte: **autor da tese**

Tabela 13 - Resultado de Acurácia, FAR, FRR e ERR para Rodada (2), composta pelas concentrações dos gases: CH_4, N_2O, C_2CO e C_2H_6 e as variáveis climáticas em análise com 30 dias para treino, 3 dias para previsão e altitude entre 7 e 16 km

Algoritmo	FAR	FRR	ERR	Acurácia
LR	0,833	0,160	0,496	0,709
NB	0,833	0,000	0,496	0,709
SVM	**0,833**	**0,120**	**0,476**	**0,741**

Fonte: **autor da tese**

Na Rodada (3) do sistema, identificamos dois modelos com Acurácias significativas. Os modelos (algoritmo) NB e SVM, que apresentaram os melhores valores para ERR nos grupos de gases testados.

Mariano (2021) considera a acurácia uma métrica que nos dá uma visão geral do resultado, uma vez que mede o total de acertos considerando o total de observações. Vamos adotar os seguintes valores para análise dos resultados:

- Baixo: entre 0 e 0,3.
- Médio: entre 0,3 e 0,7
- Alto: entre 0,7 e 1.

Assim, os valores de acurácia calculados nas três rodadas de análise apresentam um nível alto de precisão para os resultados, demonstrando um baixo risco de erro, o que traz segurança em acreditar que o modelo (algoritmo) aplicado no tratamento das relações entre as variáveis, é eficiente.

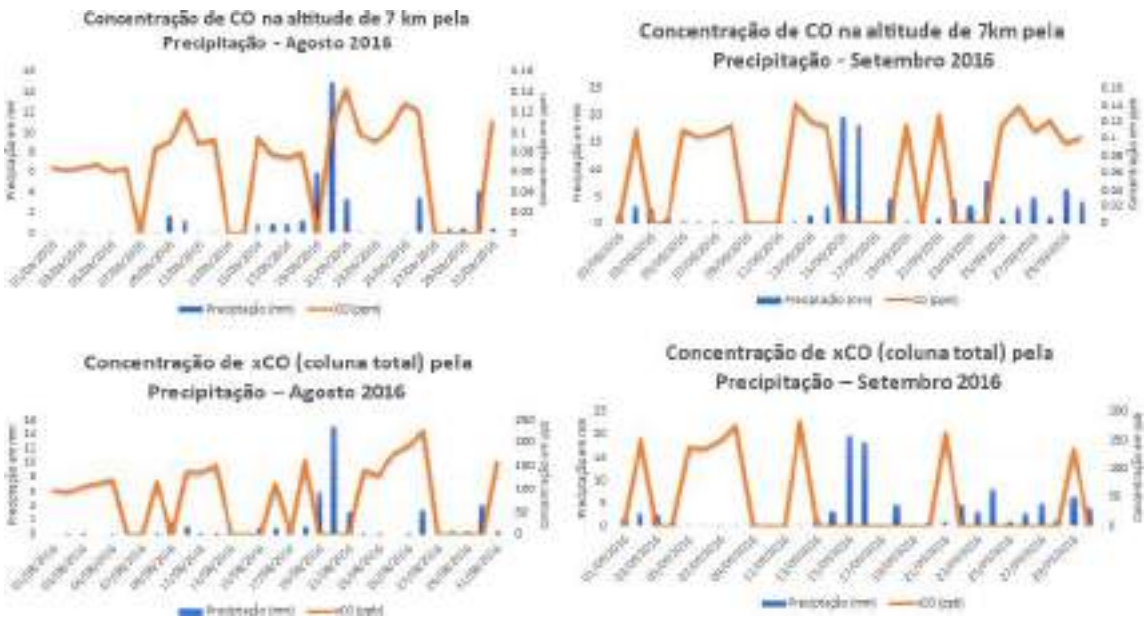
Diante dos valores de acurácia encontrados, o sistema se apresenta de forma eficiente para identificar a relação entre as variáveis analisadas, pois apresenta métricas para avaliação com resultados entre 0,7 e 0,8, o que registra uma alta confiabilidade nos resultados.

Entendendo a relação entre as variáveis climáticas e as concentrações dos gases estudados, é possível construir uma série temporal dos gases e dos modelos de previsão climática no período de 2016 a 2019.

As Figuras 38 e 39, mostram séries temporais no período de agosto a setembro de 2016 onde se observa a relação entre as variáveis de concentração de CO e CH_4, na altitude de 7 km, e a precipitação e as concentrações de xCO e xCH_4 no mesmo período. A altitude escolhida representa uma altura mediana a região onde se encontra a formação das nuvens de chuva, entre 5 e 10 km.

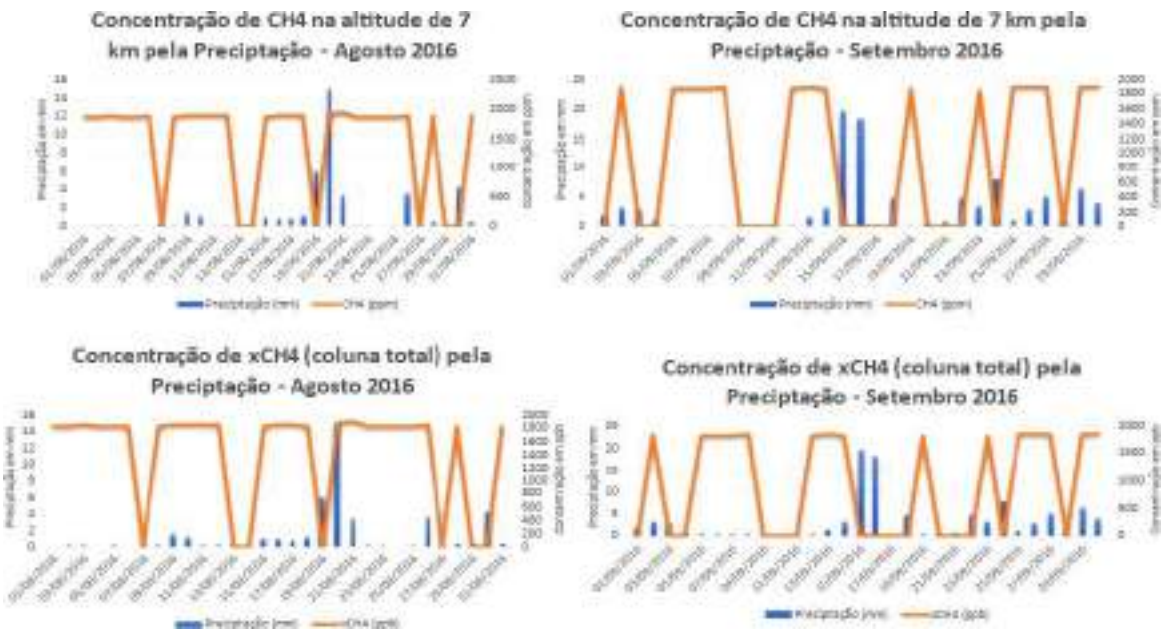
Os resultados apresentados indicam que o estudo das emissões dos gases e o volume de chuva têm uma grande chance de apresentar uma resposta significativa. Sem deixar de considerar, que as reações químicas que afetam a formação das nuvens, por exemplo, ocorrem num período (dias) anterior a precipitação efetiva registrada nos gráficos apresentados.

Figura 38 - Concentrações de CO na altitude de 7km e Precipitação de chuva (dados de satélite) nos meses de agosto e setembro de 2016 – Porto Velho Rondônia.



Fonte: **autor da tese**

Figura 39 - Concentrações de CH_4 na altitude de 7km e Precipitação de chuva (dados de satélite) nos meses de agosto e setembro de 2016 – Porto Velho Rondônia.



Fonte: **autor da tese**

É provável que a proximidade da Floresta com o local de instalação do site de pesquisa, tenha influênciado nas concentrações no periodo de transição seca/chuva devido as emissões de VOCs, desflorestamento e possíveis queimada.

5.4 Ineditismo da Tese

Os dados sobre clima (previsão e chuva efetiva) e concentração de GEE e VOCs, na região de estudo, possibilitam satisfazer as questões levantadas no ineditismo deste trabalho, que busca contribuir com os estudos de emissões naturais e antropogênicas, tornando assim um fator de ineditismo no referente assunto estudado.

Outro fator, que mostra a relevância para o inedistismo, é a instalação desse equipamento no Hemisfério Sul, especificamente em Porto Velho/RO, tornando-se o primeiro na América do Sul, de uma parceria entre o IFRO (Brasil) e o BIRA-IASB (Bélgica), para estudos mais aprofundados sobre: a Floresta Amazônica, o Ciclo do Carbono, a queima de Biomassa e as emissões das plantas (VOCs). A maioria dos sites de pesquisa instalados pelo BIRA-IASB, encontram-se no Hemisfério Norte.

A criação de uma nova metodologia de análise dos dados estudados que envolveu o desenvolvimento de um Rôbo e banco de dados, que foi desenvolvido por prototipação que pode ser empregado para consultas dinamicas, entre outras, e que possíbilitou a criação do site http://amazonrain.portovelhocalama.ífro.edu,br onde estão armazenadas informações sobre as variaveis climáticas (`previsão de chuva e chuva efetiva), de algumas cidades do estado de Rondônia; que serão úteis para novos estudos.

Assim, como a construção do algoritmo de análise dos dados/variaveis estudados, que utilizou a técnica Machine Learning (Aprendisado de Máquina) que apresentou resultados promissores, como uma nova metodologia de análise e estudos climáticos.

Os resultados encontrados e apresentados nesse trabalho foram considerados relevantes e consistentes, levando o BIRA-IASB a construir um novo equipamento, o Bruker IFS 125HR FTIR (Figura 40), que encontra-se instalado no Campus Porto Velho Calama, desde fevereiro de 2023, em substituição ao antigo Bruker 125M FTIR. O novo equipamento de caminho óptico 372 cm e umaresolução de 0,0025 cm^{-1}, irá melhorar a faixa das medidas dos gases e proporcionará a melhoria nos processos de análise de dados que foram inicialmente implementados, aplicando-os ao sistema (algoritmo) utilizado para a ánalise das variáveis já estudadas. Assim, possibilitando fazermos ajustes na metodologia, com a finalidade de consolidarmos os resultados encontrados nesse trabalho.

Figura 40 - Espectrômetro Bruker IFS 125HR FTIR, de alta resolução instalado no Campus Porto Velho Calama do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia.

Fonte: **autor da tese**

Dessa forma, o ineditismo deste trabalho, o local, as parcerias, os resultados e as perspectivas de novas informações, podem contribuir para pesquisa na região Norte do Brasil, proporcionando novas linhas de pesquisas que garantam informações e resultados que possibilitem a melhoria dos modelos de previsões climáticas, não somente para a Bacia Amazônica, mas também para outras regiões do Brasil e possivelmente para o planeta.

6 CONCLUSÃO

As seguintes conclusões deste trabalho podem ser enumeradas:

1) Durante o período de estudo, observa-se que o comportamento da quantidade de concentração dos gases, possui relação com movimentação atmosférica relativa às altitudes estudadas (troposfera). Apresentando concentrações significativas nos meses quando é observado maior número de focos de queimadas, o INPE apresentou os seguintes valores: em agosto de 2016, foram 17.724 focos e em 2017, 21.256 focos; em setembro de 2016, foram 21.339 focos e em 2017, 36.577 focos (estação de seca). Observa-se alguns gases que possuem um perfil parecido, como o CO e o H_2CO, que são considerados traçadores de queimadas e,possuem um comportamento semelhante no que se trata de picos e quedas de concentrações no período de estudo. Sendo que as maiores concentrações são apresentadas na estação de seca e menores na estação de chuva. Ao contrário do CH_4 que apresenta maiores concentrações nas estações de chuva, o que vai ao encontro com o perfil deste gás. Percebe-se que o C_2H_2, apresenta um perfil constante em suas concentrações entre os meses de fevereiro a julho de 2017, porém observando o semestre de 2016, observa-se maiores picos nasestações de seca (julho a outubro de 2016).

2) A utilização do software (robô), contribuiu para o levantamento dos dados, análise e estrutura do site onde os dados estão armazenados, na modelagem do banco de dados e finalizando, no processamento dos dados. Pois forneceu informações para a construção do algoritmo de análise que utilizou um conjunto de técnicas e ferramentas que identificou os padrões de comportamento das variáveis estudadas.

3) Os valores de acurácia encontrados na análise das variáveis, revelam que existe uma possível influência destes, não só nas previsões climáticas, mastambém no volume de chuva. Os dados sobre o clima (previsão e chuva efetiva) e concentração de GEE e VOCs, no local de estudo permitem responder os objetivos lançados para este estudo quando trabalhados com a metodologia criada para a análise desta pesquisa, tendo resposta satisfatória em relação a influência dos mesmos sobre as variáveis climáticas.

4) Ressalta-se que ainda é necessário dar continuidade e aprofundamento aos estudos, aplicando a metodologia criada, utilizando dados recentes, e considerando que esse método pode contribuir para as previsões climáticas da região, não somente para a comunidade científica, mas também para a sociedade em geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C.D. ***Essentials of Meteorology: An invitation to the Atmosphere***. 3.ed. Canadá: Brooks/Cole Thomson Learning, 2000.

ALVES, Osvaldo Luiz. **Espectroscopia Infravermelha de Fourier:** Feliz combinação de velhos conhecimentos de óptica, matemática e informática. LQES - Laboratório de Química do Estado Sólido, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, SP, 2018. Disponível: < http://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia_lqes_meprotec_espec_fourier.pdf>. Acessado em 18/07/2019.

ARNETH, A. **An IPCC Special Report on Climate Chenge, desertification, land degradation, sustainable land management, food security and greenhouse gas fluxe in terrestrial ecosystems.** Summay for Policymakers. WMO. 2019.

ARTAXO, P., OLIVEIRA, P. H., LARA, L. L. PAULIQUEVIS, T. M.,RIZZO, L. V., PIRES, C. JR., PAIXÃO, M. A., LONGO, C. M. FREITAS, S., CORREIA, A. L. **Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia**. Revista brasileira de meteorologia, v. 21, n. 3a, p. 168-22, 2006.

BASSO, L. S. **Determinação da emissão de metano da Bacia Amazônica.** 2014 123 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

BELO, E. A. **Espectroscopia vibracional de d-alamina e dl-alamina sob condições extremas.** 2013 196 p. Tese (Doutorado em Física) Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. Disponível em: http://www.repositório.ufc.br/handle/riufc/13879

BIRA-IASB – The Royal Belgian Institute for Space Aeronomy. <http://www.aeronomie.be/en/topics/globalchange/atmosphericchange.htm>Acesso em junho de 2016.

BISCARO, T. S. **Processos físicos que controlam a formação de nuvens raras e sua evolução à convecção profunda na região central amazônica.** 2019. 136 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campus.

BOSCHETTI, Cesar. **Detectores de Infravermelho:** Princípios e Caracterização, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos – SPL Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS Tecnologista Sênior III, 2008. Disponível em: < www.las.inpe.br/~cesar>. Acessado em 18/08/2019.

BUSCHMANN, M., Deutscher, N. M., Sherlock, V., Palm, M., Warneke, T., and Notholt, J.: Retrieval of xCO_2 from ground-based mid-infrared (NDACC) solar absorption spectra and comparison to TCCON, Atmos. Meas. Tech., 9, 577-585, doi:10.5194/amt-9-577-2016, 2016.

CIENFUEGOS, Freddy. **Análise:** Espectroscopia de absorção de IV por transformada de Fourier, Web revista: www.química.com.br, Editora Química e Derivados Ltda, São Paulo, SP, 25 Dez 2003. Disponível em: <https://www.quimica.com.br/analise-espectroscopia-de-absorcao-de-iv-por-transformada-de-fourier/5/>. Acessado em 28/07/2019.

CHAPMAN, P.; Clinton, J.; Kerber, R.; Khabaza, T.; Reinartz, T.; Shearer, C.; Wirth, R. ***CRISP-DM 1.0 - Step-by-step data mining guide***, 2000.

CHAMBERS, J. Q.; ARTAXO, P. **Deforestation size influences rainfall**. (2017). Nature Climate Change. Disponível em: < https://doi.org/10.1038/nclimate3238>. Acesso em: 06 mai. 2019.

CHAGAS, A. P. **A História e a Química do Fogo**, 2ª Ed., Campinas, SP, Editora Átomo, 2011.

CHIA, S. R. (1984). s. **Basic Techniques and Experiments in Infrared an FTIR spectroscopy.**

COMPRI-NARDY, M.; STELLA, M. B., OLIVEIRA, C. **Práticas de Laboratório de Bioquímica e Biofísica**. Guanabara Koogan, 2009. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/leo/site_espec/conceito.html>. Acessado em 12/11/2017.

CONRAD, E.; MISENAR S.; FELDMAN J. **Eleventh Hour CISSP® (Third Edition)**. Chapter 5 – Domain: Identity and access management (controlling access and managing identity). Study Guide, 2017. Pg 117-134. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com > Acessado em 10/10/2022.

VIGOUROUX, C.; DILS, B.; AQUINO, C.A.B.; HERMANS, C.; ZHOU, M.; LANGEROCK, B. STAVRAKOU, T.; DE MAZIÈRE, M. **Improving Knowledge of the Amazon Rainfores Emissions (IKARE),** Royal Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA -IASB), p.57, 2019.

COX, P. M.; BETTS, R. A.; JONES, C. D.; SPALL, S. A.; TOTTERDELL, I. J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a couple climate model. ***Nature***, v. 408, p. 184-187, 2000.

CRAMER, W.; BONDEAU, A.; SCHAPHOFF, S.; LUCHT, W.; SMITH, B.; SITCH, S., Tropical forests and the global carbon cycle: impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation, ***Philos. T. Roy. Soc. B***, v.359, n.1443, p.331-343, 2004.

DA SILVA, L. R. T., BARBOSA, L. G. S. & COUTINHO, C.D. **RIOS VOADORES: Como a dinâmica natural do fenômeno pode ser afetada pelo desequilíbrio ambiental na floresta amazônica.** Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, [*S. l.*], p. 1-27, 15 jun. 2019. Disponível em: http://www.editora.ufc.br/images/imagens/pdf/geografia-fisica-e-as-mudancas-globais/1119.pdf. Acesso em: 6 jul. 2020.

DEVI, R. M. ; KEERTHIKA P. ; SURESA P. ; SARANG P. P. ; SANGEETHA M. ; SAGANA C. ; DEVENDRA K. **Machine Learning For Biometrics: Concepts, Algorithms and Applications.** Capter 5 – Retina biometrics for personal authentication. A volume in Cognitive Data Science in Sustainable Computing 2022, pg. 87-104. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com > Acessado em 10/10/2022.

DRAXLER, R. R. & ROLPH, G. D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) <Model access via NOAA ARL READY Website (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php)> (2013)

ECHER, M. P. S., MARTINS, F. R. & PEREIRA, E. B. **A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua variabilidade: metodologias para aquisição de dados.** Revista Brasileira de Ensino de Física. [online]. 2006, v. 28, n. 3, pp. 341-352. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172006000300011> . ISSN 1806-9126. https://doi.org/10.1590/S1806-11172006000300011.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D.W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D.C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R., ***Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing,*** In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

FREITAS, S. R., LONGO, K. M., DIAS, M. A. F. S., DIAS, P. L. S. **Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul**. Estudos Avançados [online]. 2005, v. 19, n. 53, pp. 167-185. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100011 . ISSN 1806-9592. Acessado em:

GATTI, L. V.; MILLER, J. B.; D'AMELIO, M. T. S.; MARTINEWSKI, A.; BASSO, L. S.; GLOOR, M.; WOFSY, S.; TANS, P. Vertical profiles of CO2 above eastern Amazonia suggest a net carbon flux to the atmosphere and balance biosphere between 2000 and 2009. ***Tellus B Chemical and Physical Meteorology***, v. 62, p. 581-594, 2010.

GATTI, L.V.; GLOOR, M; MILLER, J. B.; DOUGHTY, C. E.; MALHI, L. G.: DOMINGUES, L. G.; BASSO, L. S.; MARTINEWSKI, A.; CORREIA, C. S. C.; BORGES, V. F.; FREITAS, S.; BRAS, R.; ANDERSON, L. O.; ROCHA, H.; GRACE, J.; PHILLIPS, D. L.; LIOYD, J. Drought Sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmosfheric measurements**, Nature**, v. 506, p. 76- 80, 2014.

GLOOR, M.; GATTI, L. V.; BRIENEN, R. J. W.; FELDPAUSCH, T.; PHILLIPS, O.; MILLER, J.; OMETTO J.; DA ROCHA, H. R.; BAKER, T.; HOUGHTON, R.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L.; GUYOT, J.; ZHAO, K.; JACKSON, R.; PEYLIN, P.; SITCH, S.; POULTER, B.; LOMAS, M.; ZAEHLE, S.; HUNTINGFORD, C.; LLOYD, J. The Carbon balance of South America: status, decadal trends and main determinants. ***Biogeosciences Discuss***, v. 9, p. 627–671, 2012.

LE QUÉRÉ et al.; Global Carbon Project. **Carbon Budget Presentation 2015.** http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/15/presentation.htm Acessado em: abril de 2016.

IAS – Laboratório Associado de Sensores e Materiais – INPE – **Espectro Eletromagnético.** São Paulo, 2013. Disponível em:< http://www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/espectro.htm > Acesso em: março de 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas: Amazônia Legal**. Disponível em: www.ibge.gov.br

IPCC – Intergovernamental Panel on Climate Change – **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernamental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds)]. Cambridg University Press, Cambridg, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p., 2013.

IPCC – Intergovernamental Panel on Climate Change: **Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. 2014

IPCC – Intergovernamental Panel on Climate Change – **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernamental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L.A. Meyer (eds)]. IPCC, Geneva, 151 pp, 2015.

LUZ, E. R. **Predição de propriedades de gasolinas usando espectroscopia FTIR e regressão por mínimos quadrados parciais.** 2003. 103pg. Dissertação (Mestrado – Química) Programa de Pós Graduação em Química da Puc – Rio de Janeiro. Certificação digital nº 0114349/CA. Disponível em : https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4432_1.PDF Acessado em: 11/04/2019.

MARENGO, J. ***Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI.*** 2º ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2007.

MARIN, E. P. **Espectroscopia de infravermelho e suas aplicações.** 2023. 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado – Física). Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociência e Ciências Exatas. Disponível em: https://hdl.handle.net/11449/119826 Acessado em:

MARCHIORO, E., SILVA, G.M., & CORREA, W. de S.C.**A zona de convergência do Atlântico Sul e a precipitação pluvial do município de Vila Velha (ES): repercussões sobre as inundações.** Revista do departamento de Geografia, 31, 101-117. https://doi.org/10.11606/rdg.v31i0.108447 Disponível em: www.revistas.usp.br Acesso em: 08 de abril de 2020.

MALHI, Y.; MEIR, P.; BROWN, S.. **Forest, carbon and global climate.** Philosofical Transaction Royal Sociery Lond. A, v. 360, p. 1567-1591, 2002.

MALHI, Y.E.; WRIGHT, J., Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions, ***Philos. T. Roy. Soc. B***, v.359, p.311-329, **2004**.

MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. ***Segunda Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima***. Brasília, 2010.

MORAIS, C. S. **Estudo da evolução das concentrações de metano na última década na Amazônia**. 2019. 68p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

MOSS, G. **Rios voadores: o papel da Floresta Amazônica no clima brasileiro.** 2015. Disponível em: http://repositório.ifsc.usp.br//handle/RllFSC/4030 Acesso em: 08 de maio de 2020.

NEPSTAD, D.C., VERISSIMO, A., ALENCAR, A., NOBRE, C., LIMA, E., LEFEBVRE, P., SCHLESINGER, P., POTTER, C., MOUTNHO, P., MENDOZA, E., COCHRANE, M., BROOKS, V. **Large scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire.** *Nature***,** v. 398, p. 505-508, 1999.

NEPSTAD, D. C., MOUTINHO, P., DIAS-FILHO, M. B., DAVIDSON, E.,CARDINOT, G. MARKEWITZ, D., FIGUEIREDO, R., VIANNA, N., CHAMBERS, J.,RAY, D., GUERREIROS, J. B., LEFEBVRE, P., STERNBERG, L., MOREIRA, M., BARROS, L., ISHIDA, F. Y., TOHLVER, I., BELK, E., KALIF, K., SCHWALBE, K.
The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon Forest. *J. Geophys.Res.***,** v. 107, D20, 8085, doi:10.1029/2001JD000360, 2002.

OLIVEIRA, L. F. C. **Espectroscopia Molecular**. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, nº 4, maio, 2001. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/04/espect.pdf>. Acesso em: 11/09/2017

PASQUINI, C. **Near infrared spectroscopy: fundamentals pratical aspects and analytical applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society,*** *São Paulo v. 14, n 2*, pp. p 198 – 219. 2003.

PERZ, S. G., SOUZA, C. J., ARIMA, E. CALDAS, M., BRANDÃO, A. O. Jr, SOUZA, F. K. A., WALKER R. **O dilema das estradas não oficiais na Amazônia.** 2005. Revista Ciência Hoje, p. 37, 56-58.

RENSSEN, H. & KNOOP, J. M. **A global river routing network for use in hydrological modeling**. *Journal of Hygiene,* v. 230, p. 230-243, 2000.

RODGERS, C. D.: Inverse Methods for Atmospheric Sounding: The- ory and Practice, Vol. 2, World Scientific, Singapore, 2000.

ROBERTSON, A. W. & MECHOSO, C. R. **Interanual and Interdecadal variability of the South Atlantic Convergence Zone.** Revista: Monthly Weather Review. Vol.

128 p. 2947 – 2957, 2000. Doi: https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2947:IAIVOT>2.0.CO;2 Disponível em:<https: journals.ametsoc.org> Acesso em: 15 março de 2020.

ROCHA, W. M. ***Da belle-epoque à bréa-epoque* – Relações Internacionais e a governança das mudanças climáticas na Amazonia: um diálogo entre o publico, o privado e o internacional no desenvolvimento sustentável dos Estados do Pará e do Amazonas.** 2019. 235 p. Tese (Doutorado em Relações Internacionais) Universidade de Brasília. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/37013 Acesso em: 09 jun. 2021.

ROCHA, V. M., CORREIA, F. W. S., SILVA, P. R. T., GOMES, W. B., VERGASTA, L. A., MOURA, R. G., TRINDADE, M. S. P., PEDROSA, A. L., SILVA, J. J. S. **Reciclagem de Precipitação na Bacia Amazônica: O Papel do Transporte de Umidade e da Evapotranspiração da Superfície.** Revista Brasileira de Meteorologia [online]. 2017, v. 32, n. 3, pp. 387-398. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-77863230006>. ISSN 1982-4351. https://doi.org/10.1590/0102-77863230006. Acessado 10 jun. 2022.

RODRIGUES, H.P. **Zona de convergência do Atlântico Sul: um estudo observacional e numérico.** 2016. 67f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Pós-Graduação em Meteorologia. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, PB. 2012. Disponível em: http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/hande/e/riufcg/4800 Acesso em 09 maio 2020.

ROTHMAN, L. S., JACQUEMART, D., BARBE, A., CHRIS BENNER, D., BIRK, M., BROWN, L., CARLEER, M., CHACKERIAN JR, C., CHANCE, K., COUDERT, L. E. A., COUDERT, L. H., DANA, V., DEVI, V. M., FLAUD, J.-M., GAMACHE, R. R., GOLDMAN, A., HARTMANN, J.-M., JUCKS, K. W., MAKI, A. G., MANDIN, J.-Y., MASSIE, S. T., ORPHAL, J., PERRIN, A., RINSLAND, C. P., SMITH, M. A. H., TENNYSON, J., TOLCHENOV, R. N., TOTH, R. A., VANDER AUWERA, J., VARANASI, P., AND WAGNER, G.: **The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database, J. Quant. Spectrosc.** Ra., 96, 139–204, 2005.

ROTHMAN, L. S., GORDON, I. E., BARBE, A., BENNER, D. C., BERNATH, P. F., BIRK, M., BOUDON, V., BROWN, L. R., CAMPAR- GUE, A., CHAMPION, J.-P., CHANCE, K., COUDERT, L. H., DANA, V., DEVI, V. M., FALLY, S., FLAUD, J.-M., GAMACHE, R. R., GOLD- MAN, A., JACQUEMART, D., KLEINER, I., LACOME, N., LAFFERTY, W. J., MANDIN, J.-Y., MASSIE, S. T., MIKHAILENKO, S. N., MILLER, C. E., MOAZZEN-AHMADI, N., NAUMENKO, O. V., NIKITIN, A. V., OR- PHAL, J., PEREVALOV, V. I., PERRIN, A., PREDOI-CROSS, A., RINSLAND, C. P., ROTGER, M., ŠIMECKOVÁ, M., SMITH, M. A. H., SUNG, K., TASHKUN, S. A., TENNYSON, J., TOTH, R. A., VANDAELE, A. C., AND VANDER AUWERA, J.: **The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database, J. Quant. Spectrosc**. Ra., 110, 533–572, 2009.

GABARDO, G., SARZEDAS, C. G. & DA SILVA, H. L. **Queimadas na Amazônia brasileira: Brasil em chamas.** 2021. Disponível em: https://downloads.editoracientifica.org/articles/200800872.pdf . Acesso em: 12 dez. 2021.

SALA, O. **Fundamentos da Espectroscopia Raman e no Infravermelho.** Unep, São Paulo, 2ª edição 2011. ISBN: 9788571398689.

SCHIERMEIER Q., **Global methane levels soar to record high**. Nature. 2020 Jul 14. doi: 10.1038/d41586-020-02116-8.

SENA, E. T. **Variabilidade espacial e temporal da forçante radiativa direta de aerossóis de queimada e os efeitos da mudança de uso do solo na Amazônia.** 2013. Tese (Doutorado em Física) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, J. P. R.; REIBOTA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. **Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes.** Revista Brasileira de Climatologia. ISSN: 2237-8642 (Eletrônica). Ano 15 – Vol. 25 p. 355-377, 2019.

SILVA, K. A.; SANTOS, M. R. P.; SILVA, M.; GIACON, J. F.; BORGES, T. A **utilização do método Cross-Industry Standard Process for Data Mining no processo de mineração de textos: extração de termos para criação de uma tecnologia assistiva para o auxílio à alunos com deficiência motora**. 2016.

SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; ALLEY, R.B.; BERNTSEN, T.; BINDOFF, N.L.; CHEN, Z.; CHIDTHAISONG, A.; GREGORY, J.M.; HEGERL, G.C.; HEIMANN, M.; HEWITSON, B.; HOSKINS, B.J.; JOOS, F.; JOUZEL, J.; KATTSOV, V.; LOHMANN, U.; MATSUNO, T.; MOLINA, M.; NICHOLLS, N.; OVERPECK, J.; RAGA, G.; RAMASWAMY, V.; REN, J.; RUSTICUCCI, M.; SOMERVILLE, R.; STOCKER, T.F.; WHETTON, P.; WOOD, R.A.; WRATT, D., Technical Summary, In: Climate Change 2007: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

SKOOG, WEST, HOLLER, & CROUCH. 2011. **Fundamentos de Química Analítica**, Tradução da 8ª Edição norte-americana. São Paulo – SP. Editora Cengage Learning.

STEPHENS, G.L.; LI, J.; WILD, M.; CLAYSON, C.A.; LOEB, N.; KATO, S.; L'ECUYER, T.; STACKHOUSE JR, P.W.; LEBSOCK, M.; ANDREWS, T., **An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations**, ***Nat. Geosci.***, v.5, p.691-696, **2012**.

VENKATARAMAN, S.V.; INIYANB, S.; GOIC R., A review of climate change, mitigation and adaptation, ***Renew. & Sust. Energ. Rev.***, n.16, p.878–897,**2012**.

VIEIRA, S. O. **Efeitos da zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre as chuvas da região sul da Amazônia Brasileira.** 2013. 95 p. (Doutorado em Clima e Meio Ambiente) Instituto Nacional, de Pesquisas da Amazônia, Manaus. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/12947> Acesso em 15 abr. 2022.

ZHOU, M., WANG, P., LANGEROCK, B., VIGOUROUX, C., HERMANS, C., KUMPS, N., WANG, T., YANG, Y., JI, D., RAN, L., ZHANG, J., XUAN, Y., CHEN, H., POSNY, F., DUFLOT, V., METZGER, J. M., DE MAZIÈRE, M., **Ground-based Fourier transform infrared (FTIR) O3 retrievals from the 3040 cm – 1 spectral range at Xianghe, China.** Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13, pp.5379 - 5394. ff10.5194/amt-13-5379-2020ff. ffhal-03052088

WALLACE, J.M.; HOBBS, P.V., **Atmospheric Science: an introductory survey**, Ed. Academic Press, 2ª edição, United States, 2006.

WMO – Word Meteorological Organization. **Greenhouse Gas Bulletins.** ***The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Using Global Observations through 2008*****. n.5, 2009**. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/ghg-bulletin 2008_en.pdf>. Acesso: 4 fevereiro. 2016.

WMO – Word Meteorological Organization. **Greenhouse Gas Bulletins.** ***The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2009*****. n.6, 2010.** Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/ GHG_bull_6en.pdf>. Acesso: 01 março. 2016.

WMO – Word Meteorological Organization. **Greenhouse Gas Bulletins.** ***The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2010*****. n.7, 2011.** Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/ GHGbulletin_7_en.pdf>. Acesso: 10 março. 2016.

WMO – Word Meteorological Organization. **Greenhouse Gas Bulletins.** ***The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2011*****. n.8, 2012.** Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/ GHG_Bulletin_No.8_en.pdf>. Acesso: 11 mar. 2016.

WMO – Word Meteorological Organization. **Greenhouse Gas Bulletins.** ***The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2012*****. n.9, 2013.** Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG_Bulletin_ No.9_en.pdf>. Acesso: 10 abril. 2016.

WMO - World Meteorological Organization. ***Greenhouse Gas Bulletin - The state of Greenhouse gases in the atmosphere using global observation throught 2014. N.11, 2015***. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG_Bulletin_No11 en.pdf>. Acesso em 02 maio 2016.

YAMOSOE, Márcia Akemi e CORRÊA, Marcelo de Paula. **Processos Radioativos na Atmosféra, Fundamentos**, São Paulo, Oficina de Textos, 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
http://www.ipen.br

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.