

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE - CLIAMB**

**RELAÇÃO ENTRE O₃ TROPOSFÉRICO E CO SOBRE ÁREAS DE FLORESTA E
PASTAGEM A PARTIR DE SONDAGENS AQUA**

JURANDIR MOURA DUTRA

Manaus – Amazonas
Outubro/2012

JURANDIR MOURA DUTRA

**RELAÇÃO ENTRE O₃ TROPOSFÉRICO E CO SOBRE ÁREAS DE FLORESTA E
PASTAGEM A PARTIR DE SONDAGENS AQUA**

Orientador: Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza

Co-Orientador: Dr. Júlio Tóta da Silva

Dissertação apresentada ao INPA/UEA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CLIMA E AMBIENTE, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
CLIMA E AMBIENTE.

Manaus – Amazonas

Outubro/2012

JURANDIR MOURA DUTRA

RELAÇÃO ENTRE O₃ TROPOSFÉRICO E CO SOBRE ÁREAS DE FLORESTA E
PASTAGEM A PARTIR DE SONDAGENS AQUA.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia e da Universidade do Estado do Amazonas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente.

Data da aprovação: 01 de outubro de 2012.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza - Orientador
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Prof^a. Dra. Jaidete Monteiro de Souza – Membro Interno
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Prof^a. Dra. Cláudia Boian Aires – Membro Externo
Universidade Federal do ABC - UFABC

Dutra, Jurandir Moura

Dissertação (mestrado) - INPA, Manaus, 2012-08-31

Orientador: Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza

Co-Orientador: Dr. Júlio Tóta da Silva

Área de Concentração: Clima e Ambiente

Sinopse:

Estudou-se o comportamento das concentrações de O₃ em três paisagens: Floresta, Pastagem e Região Metropolitana de Manaus - RMM, utilizando ferramentas estatísticas (*wavelets*), para análises das variáveis – CO e queimadas - que interferem na dinâmica do ozônio troposférico.

Palavras-chave: Ozônio troposférico, monóxido de carbono, queimadas, sondagem *AQUA*, poluição atmosférica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me fez nascer a fim de cumprir algum propósito.

Aos professores, Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza e Dr. Júlio Tóta da Silva, pela oportunidade depositada no desenvolvimento desse trabalho, apoio, dedicação, orientação e compreensão que me foi dispensada.

Agradeço a minha família, pais e irmãos, mas em especial ao meu primo-irmão Marcelo José de Lima Dutra, pelo apoio, auxílio e compreensão fundamental em todos os momentos. Agradeço, ainda, a sua esposa Luiza Oliva Dutra, uma das principais mentoras para a obtenção desse grau.

Aos meus amigos em geral, com destaque à Samara Menezes e Mateus Marinho, pelo apoio, carinho, dedicação e força, fundamentalmente essencial durante o processo.

Agradeço a James Araujo do Nascimento Júnior, meu filho de coração e do meu amor.

Aos meus amigos de cursos que foram, talvez, os mais imediatos companheiros nas horas mais difíceis. Contudo, dois foram ímpares, porque contribuíram sobremaneira para a execução desse trabalho: Eliane Gomes Alves e Glauber Guimarães Cirino.

A CAPES, por fomentar a bolsa de estudo, ao INPA e a UEA idealizadores do projeto de Pós- Graduação em Clima e Ambiente - CLIAMB.

Por fim, agradeço a todos que auxiliaram direta ou indiretamente nessa pesquisa, mas, sobretudo, agradeço ao cidadão brasileiro, contribuinte de seus tributos, pois propiciou meios para que esse programa existisse, a fim de promover o devido retorno à sociedade.

RESUMO

Relações entre estimativas de ozônio (O_3) troposférico associado a monóxido de carbono (CO) oriundo, sobretudo, da queima de biomassa em duas regiões do Brasil com uso diversificado da terra, foram estudadas através de análises observacionais da plataforma *AQUA* para o período de 2003 a 2010. O objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade das concentrações de O_3 troposférico e as relações com a variabilidade das concentrações de CO. Foram estudadas duas áreas de um quadrado medindo $5^\circ \times 5^\circ$, sendo o primeiro centrado sobre a cidade de Sinop – MT, denominado de região de pastagem e o segundo sobre as coordenadas geográficas $2,5^\circ$ de latitude sul e 60° de longitude oeste, próximo a sede do município de Tefé-AM, denominado região de floresta. Ainda assim, definiu-se um quadrado de $3^\circ \times 3^\circ$ centrado sobre a cidade de Manaus, cuja região é submetida a forte processo de urbanização. Os resultados obtidos sugerem que as concentrações de O_3 são incrementadas pelas concentrações de CO que avolumam-se na estação seca quando são observados aumentos nos focos de queimada. O fenômeno das queimadas é recorrente, está associado às mudanças de uso da terra para o desenvolvimento de atividades agropastoris e sua dinâmica é modulada pela climatologia de precipitação. Além disso, a intensidade é definida pelos extremos climáticos associados a ENOS. A sazonalidade é evidente tanto para a série de gases (O_3 e CO) como para as séries de queimadas e precipitação. As análises de coerência e fase entre as séries de CO e O_3 , queimadas e CO e queimadas e O_3 sugerem uma relação moderada a forte entre as variáveis para diferentes escalas temporais. Para uma escala de tempo de 0,25 anos a 1 ano (três meses a um ano) o fluxo de CO precede o fluxo de O_3 sem diferença de fase para todos os anos da série, sugerindo que incrementando as concentrações de CO há incremento imediato de O_3 . Quando cruzadas as séries de queimadas com as séries de CO, observou-se significância estatística apenas para o nível de 850 mb e uma forte relação de dependência para a mesma escala de tempo apenas para a região de pastagem. Para a região de floresta e Manaus esta escala de tempo em que a significância da relação foi elevada ficou entre 0,5 anos a 1 ano (seis meses a um ano), com uma defasagem 45° sugerindo que os episódios de queimadas estão adiantados em relação a série de CO, com uma diferença de fase de 20 a 45 dias. No cruzamento das séries de queimadas e O_3 encontrou-se relevância apenas para o nível de 500 mb e somente na paisagem de pastagem. Estes resultados sugerem que as concentrações de CO são incrementados no período das queimadas e consequentemente produzem O_3 . Neste sentido, o uso de ferramentas remotas para compreender estas relações entre gases e queimadas é importante para o desenvolvimento de políticas públicas de saúde. Da mesma forma, o ciclo de variabilidade é confiável e pode auxiliar os modelos de qualidade do ar para fins de monitoramento da poluição.

Palavras-chave: Ozônio troposférico, monóxido de carbono, queimadas, sondagem *AQUA*, poluição atmosférica.

ABSTRACT

Relationships between the estimates of tropospheric ozone (O_3) and carbon monoxide (CO), mainly from biomass burn and changes in land use of two regions of Brazil, were studied using observational analysis from the *AQUA* platform from 2003 to 2010. The objective of this research was to study the variability of tropospheric O_3 concentration and its relationship with the variability of CO concentration. It was studied two areas (square of $5^\circ \times 5^\circ$), the first area is a pasture located in Sinop–MT, and the second one is a primary forest close to Tefé-AM (2.5° S 60° W). Additionally, it was defined a square of $3^\circ \times 3^\circ$ in the central of Manaus-AM, whose region is submitted to strong urbanization process. The results suggest that the O_3 concentrations are increased by the increase of CO concentrations during dry season, when it is observed the increasing of outbreaks of fires. Fires are frequent and are associated to changes in land use for activities of agriculture and cattle, and its dynamic is modulated by the climatology of precipitation. Moreover, the intensity of fires is defined by extreme climatic events associated to ENOS. The seasonality occurs for both gases series (CO and O_3) as for the series of precipitation and fires. Analyses of coherence and phase between series of CO and O_3 , CO and fires, and O_3 and fires suggest a moderate to strong relationship between the variables for different time scales. For a time scale from 0.25 year to one year (three months to one year), the flux of CO first occurs that O_3 flux with no phase difference for all years of the study, which suggests that the increasing of CO concentrations causes increasing of O_3 . The relationship of fires and CO was statistically significant only for the level of 850 mb and a strong dependent relationship, for the same time scale, only for pasture area. For the forest region and Manaus, the relationship of fires and CO was statistically significant for a different time scale – 0.5 year to one year (six month to one year) – with difference in the phase of 45° , which suggests that fires occur from 20 to 45 days first that CO fluxes. The relationship of fires and O_3 was statistically significant only for the level of 500 mb and only for pasture area. These results suggest that CO concentrations are incremented during periods of fire and then, consequently, produce O_3 . In this context, the use of remote tools (e.g. remote sensing) to understand the dynamic of gases in relation to fires is important to develop health public politics. In the same way, the cycle of variability is reliable and can help the models of air quality and pollution monitoring.

Key-words: Tropospheric ozone, carbon monoxide, fires, *AQUA* sounding, atmospheric pollution.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO.....	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
4. DADOS E METODOLOGIA.....	23
4.1. Área de estudo.....	23
4.2. Dados.....	25
4.3. Metodologia.....	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1. Séries temporais diárias e anomalias de O ₃ , Co e Focos de Queimadas.....	29
5.2. Séries temporais mensais e anomalias de precipitação sobre região de floresta, pastagem e Manaus	48
5.3. Ciclo sazonal de O ₃ , CO, Focos de Queimadas e Precipitação sobre a região de floresta, pastagem e Manaus	55
5.4. Análise de coerência e fase entre CO, Queimadas e O ₃	68
6. CONCLUSÃO.....	80
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.0. Áreas de estudo: em destaque círculo vermelho do município de Tefé, Sinop, e Manaus, quadrados de aproximadamente 250.000 e 90.000 km ² , respectivamente.....	23
Figura 4.1. Estado do Amazonas: em destaque (vermelho) o município de Tefé, ponto os arredores da área de um quadrado de aproximadamente 250.000 km ²	24
Figura 4.2. Estado do Mato Grosso: em destaque (vermelho) o município de Sinop, ponto central da área de um quadrado de aproximadamente 250.000 km ²	24
Figura 4.3. Região Metropolitana de Manaus: área de um quadrado de aproximadamente 90.000 km ² , com significativa pressão humana e forte urbanização.....	25
Figura 4.4. Etapas do processo metodológico.....	26
Figura 5.1 - Concentração diária de O ₃ sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.....	31
Figura 5.2 - Concentração diária de O ₃ sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.....	31
Figura 5.3 – Concentração diária de O ₃ sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.	32
Figura 5.4 - Anomalias diárias de O ₃ sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010 no nível de 750 mb.....	34
Figura 5.5 - Anomalias diárias de O ₃ sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010 no nível de 750 mb.....	34

Figura 5.6 - Anomalias diárias de O ₃ sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010 no nível de 750mb.....	35
Figura 5.7- Concentração diária de CO sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.....	37
Figura 5.8 - Concentração diária de CO sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.....	38
Figura 5.9 - Concentração diária de CO sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.....	38
Figura 5.10 - Anomalias diárias de CO sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010 no nível de 750mb.....	40
Figura 5.11 - Anomalias diárias de CO sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010 em três níveis de pressão.....	40
Figura 5.12 - Anomalias diárias de CO sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010 em três níveis de pressão.	41
Figura 5.13 – Série temporal diária de queimadas sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010.....	44
Figura 5.14 – Série temporal diária de queimadas sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010.....	44
Figura 5.15 – Série temporal diária de queimadas sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010.....	45
Figura 5.16 – Anomalias diárias de queimadas sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010.....	46
Figura 5.17 – Anomalias diárias de queimadas sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010.....	47

Figura 5.18 – Anomalias diárias de queimadas sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010.....	47
Figura 5.19 – Série temporal mensal de precipitação sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010.....	51
Figura 5.20 – Série temporal mensal de precipitação sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010.....	52
Figura 5.21 – Série temporal mensal de precipitação sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010.....	52
Figura 5.22 – Anomalias mensais de precipitação sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010.....	54
Figura 5.23 – Anomalias mensais de precipitação sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010.....	54
Figura 5.24 – Anomalias mensais de precipitação sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010.....	55
Figura 5.25 – Distribuição sazonal de O ₃ em região de floresta para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.....	58
Figura 5.26 – Distribuição sazonal de O ₃ em região de pastagem para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.....	59
Figura 5.27 – Distribuição sazonal de O ₃ na região de Manaus para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.....	60
Figura 5.28 – Distribuição sazonal de CO em região de floresta para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.....	62
Figura 5.29 – Distribuição sazonal de CO em região de pastagem para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.....	63

Figura 5.30 – Distribuição sazonal de CO na região de Manaus para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.....	64
Figura 5.31 – Distribuição sazonal de queimadas nas regiões de floresta, pastagem e Manaus para o período de 2003 a 2010.....	66
Figura 5.32 – Distribuição sazonal de chuvas nas regiões de floresta, pastagem e Manaus para o período de 2003 a 2010.....	67
Figura 5.33 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O ₃ , nos nível de 500 mb para a região de floresta.....	69
Figura 5.34 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O ₃ , nos nível de 750 mb para a região de floresta.....	70
Figura 5.35 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O ₃ , nos nível de 850 mb para a região de floresta.....	70
Figura 5.36 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O ₃ , no nível de 500 mb para a região de Manaus.....	72
Figura 5.37 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O ₃ , no nível de 750 mb para a região de Manaus.....	72
Figura 5.38 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O ₃ , no nível de 850 mb para a região de Manaus.....	73

Figura 5.39 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O ₃ , no nível de 500 mb para a região de pastagem.....	74
Figura 5.40 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O ₃ , no nível de 750 mb para a região de pastagem.....	75
Figura 5.41 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O ₃ , no nível de 850 mb para a região de pastagem.....	75
Figura 5.42 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de queimadas e CO em 850 mb para a região de floresta.....	77
Figura 5.43 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de queimadas e CO em 850 mb para a região de pastagem.....	77
Figura 5.44 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de queimadas e CO em 850 mb para a região de Manaus.....	78
Figura 5.45 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de queimadas e O ₃ em 500 mb para a região de Pastagem.....	79

1. INTRODUÇÃO

O ozônio (O_3) é um gás oxidante, presente na troposfera em pequenas concentrações traço, sendo formado por reações fotoquímicas na atmosfera. Na estratosfera, uma camada da atmosfera terrestre entre 15 e 50 km de altitude, o gás ozônio ocorre naturalmente e é benéfico para a vida em nosso planeta, formando uma camada que protege a Terra da radiação solar prejudicial. Existe uma preocupação com o declínio do ozônio estratosférico e como isto pode levar a mais problemas de saúde para as pessoas e para os ecossistemas. A camada desse gás é tão rarefeita, que se fosse comprimida à temperatura de solidificação da água e à pressão ao nível do mar, não ultrapassaria poucos milímetros de espessura (Logan *et al.* 1981).

O ozônio troposférico, gerado a partir de precursores lançados na atmosfera através das atividades econômicas, é um poluente que além de elevar os gastos do sistema de saúde, também afeta a produtividade agrícola. Nos últimos anos, a comunidade científica descobriu que esses problemas de saúde da população e do meio ambiente estão ligados a esse composto químico presente na atmosfera, alótropo triatômico do oxigênio, cuja molécula é bastante instável, altamente reativa e oxidante (Logan *et al.* 1981). Entretanto, ainda há dúvidas acerca dos impactos causados na qualidade do ar e nas mudanças climáticas, uma vez que esse gás é considerado de efeito estufa (IPCC 2001).

No entanto, o ozônio na troposfera tem implicações muito diferentes. Em vez do cobertor de proteção da estratosfera, o ozônio da baixa troposfera - também chamado ozônio troposférico - é um agente prejudicial às pessoas, animais e plantas (Logan *et al.* 1981). Embora o fato de que o ozônio, seja na estratosfera ou na troposfera, ocorra naturalmente, o ozônio troposférico é formado também por meio das atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis ou de biomassa. Durante o século passado, a quantidade de ozônio troposférico mais do que duplicou, acompanhando o aumento da população, dos automóveis e da indústria (Logan 1985).

No Brasil a queima de biomassa é uma prática generalizada, especialmente por utilizar o fogo na limpeza de florestas e pastagens para a agricultura e para o descarte de resíduos de culturas agrícolas. Entre os seus impactos ambientais, queimadas liberam grandes quantidades

de monóxido de carbono (CO) na atmosfera, o qual reage com outros produtos químicos para a produção de ozônio. Isso acontece através de reações fotoquímicas de óxido de nitrogênio, monóxido de carbono e hidrocarbonetos, gerando ozônio (Kirchhoff 1996; Armenteras 2012).

Na atmosfera o CO reage com o radical hidroxila (OH), que tem papel fundamental nas reações químicas atmosféricas. Esta reação reduz a abundância de OH, sugerindo um forte potencial do CO controlar indiretamente a capacidade oxidativa da troposfera em conjunto com as reações rápidas com o óxido de nitrogênio e hidrocarbonetos, o que influencia na formação e remoção de ozônio (Logan 1985).

Com o avanço do desenvolvimento de instrumentação baseada em sensores remotos de alta resolução permite-se observar e estimar as concentrações de CO e ozônio em tempo e espaço mais adequados aos sinais de emissões destes compostos. Ambas as medidas de CO e ozônio feitas simultaneamente e em diferentes altitudes, permite aos cientistas, por exemplo, ver em que medida a queima de biomassa contribui para o ozônio na troposfera. Além disso, também se utiliza os perfis de CO para determinar perfis de temperatura/pressão e características da camada limite atmosférica. Com o surgimento destes importantes instrumentos para estudar a concentração de gases minoritários na atmosfera, de maneira conjunta, simultânea e em grande escala, as pesquisas foram facilitadas. Dentre estes se destacam os sondadores a bordo de satélites ambientais com sensores hiperespectrais.

Esses satélites possuem sistemas de sondagem com alta resolução espectral que buscam estimar a concentração de gases enquanto estimam variáveis do sistema climático. Com essa tecnologia, foram lançados vários sensores a bordo de satélites capazes de estimar o perfil de gases da coluna atmosférica, entre eles, o “*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*” - *IASI* (possuindo mais de 8000 canais espectrais) e o “*Atmospheric Infrared Sounder*” – *AIRS* com 2378 canais no infravermelho próximo, dos quais 26 canais estimam O₃ (Monahan et al., 2007). O *Atmospheric Infrared Sounder - AIRS*, lançado em maio de 2002, faz parte da plataforma *AQUA* e foi o primeiro sondador avançado capaz de estimar nas bandas de 650 a 2700 nm, com resolução de 50 x 50 km, representando um divisor de marcos na tecnologia de sensoriamento remoto, graças a sua alta capacidade de estimar a concentração de gases-traço (Aumann et al. 2003).

As estimativas de ozônio obtidas com essa tecnologia têm auxiliado vários trabalhos que avaliam a sua qualidade. Para isso, estudos têm sido dirigidos no intuito de validar os dados do sensor *AIRS*, versão 5, com medições em aeronaves e radiossondagem. Os vieses encontrados em alguns sítios e experimentos revelam números variados em estratos diferentes da atmosfera, com gradiente positivo em direção à superfície (Gettelman *et al.* 2004; Monahan *et al.* 2007; Bian *et al.* 2007;). Contudo, há estudos que apontam que principal vantagem dessa tecnologia é capacidade de definir as tendências e os padrões de sazonalidade (Divakarla *et al.* 2008).

As emissões de precursores de ozônio, no Brasil, têm duas origens distintas, mas interligadas. Os precursores são lançados a partir da queima de combustível fóssil, no desenvolvimento das atividades econômicas e sociais humanas e na queima de biomassa para a agricultura e a pecuária, seja ela intensiva ou de subsistência. A prática é comum e recorrente, entretanto as queimadas facilitam as mudanças de uso da terra e são a principal causa das emissões brasileiras (Rummel *et al.* 2007).

Portanto, estudar em que grau as concentrações de ozônio na troposfera são devidas às atividades dos seres humanos ou são naturais são tópicos de pesquisa atual. Estudar como, onde e por que o ozônio varia e será formado na troposfera tropical é importante para entender como podemos evitar a poluição atmosférica e os seus desdobramentos.

Dentro desse contexto, este projeto de pesquisa tem como objetivo estudar a relação entre a variabilidade temporal do ozônio e do monóxido de carbono sobre duas regiões com coberturas vegetais distintas: floresta e pastagem. Estas análises serão realizadas com oito anos de sondagens AQUA. Através desse estudo será possível entender melhor as relações entre a concentração de ozônio e de monóxido de carbono troposférico, particularmente, devido às queimadas na região, uma vez que o CO é um importante precursor de ozônio e controlador indireto da capacidade oxidativa da troposfera. Além disso, este estudo visa auxiliar, com seus resultados, grupos de pesquisa que trabalham com assimilação de dados de satélites em modelos de qualidade do ar.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é estudar a variabilidade das concentrações de ozônio troposférico sobre dois tipos diferentes de paisagem: floresta e pastagem, além de suas relações com a variabilidade das concentrações de monóxido de carbono (CO). Para isso serão utilizadas as estimativas remotas do satélite AQUA para o período de 2003 a 2010, além de dados de precipitação e de número de focos de queimadas por satélites.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Estudar o ciclo sazonal das concentrações de O₃ troposférico e suas relações com a concentração de CO para dois diferentes tipos de paisagem: floresta tropical e pastagem em três níveis de pressão (500 mb, 750 mb e 850 mb);

- II. Estudar os ciclos de variabilidade do O₃ troposférico, suas relações com a concentração de CO e queimadas;

- III. Estudar casos de valores extremos (O₃ e CO) sobre a região, buscando entender melhor as relações entre a concentração desse gás e as anomalias climáticas e/ou precipitação;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O oxigênio (O_2) responde por aproximadamente 21% da composição química da atmosfera terrestre. Sabe-se, no entanto, que se trata de um gás vital para manutenção da vida no planeta. Contudo, este gás representa também, a possibilidade de recombinação triatômica alotrópica, formando o ozônio (O_3). O ozônio na estratosfera tem importância crucial na filtragem de parte da radiação ultravioleta do Sol, cujos comprimentos de onda são inferiores a 300 nm. Em contato com essa radiação, a molécula de O_3 se dissocia produzindo um átomo de oxigênio e uma molécula de O_2 . Por outro lado, a presença do O_3 na baixa troposfera significa risco à saúde humana, sendo o principal causador do câncer de pele. Além de câncer, o ozônio causa irritação nos olhos e vias respiratórias e restringe a capacidade pulmonar. Produz, também, fitotoxicidade a algumas plantas, capaz de reduzir a produção agrícola, pois inibe o seu crescimento, o que causa impacto econômico sobre culturas como soja, milho, feijão, entre outras (Logan *et al.* 1981).

A remoção de uma molécula de O_3 em contato com radiação ultravioleta é decorrente da quebra de um átomo de oxigênio excitado e uma molécula do gás oxigênio. Logo, uma reação de um átomo de oxigênio excitado com uma molécula de água produz 2 radicais hidroxila (OH), funcionando como removedor atmosférico dada a sua instabilidade. Na troposfera, o O_3 é formado a partir da combinação de um átomo de oxigênio com uma molécula de gás oxigênio na presença de um outro gás que receberá a energia química gerada na reação. Mas, é removido por fotólise envolvendo radiação ultravioleta e uma molécula de O_3 (Logan, *et al.*, 1981; Logan, 1985). O O_3 não é lançado diretamente na troposfera. Este alótropo do oxigênio entra nessa camada de duas maneiras: por trocas realizadas entre a estratosfera e a troposfera, sendo removido por interações que ocorrem com a superfície ou devido às atividades antropogênicas que produzem seus precursores (Kirchhoff 1988).

As reações com o O_3 , seja para remoção ou formação, envolve uma gama de outros reagentes (vários hidrocarbonetos, CO e NO_x) mas, também, compostos orgânicos voláteis, como isopreno C_5H_8 , cujas emissões biogênicas são fundamentais neste processo em regiões tropicais, dada a alta disponibilidade de umidade e maior incidência de radiação solar (Kirchhoff 1990). Aproximadamente 1,8 Gt de Compostos Orgânicos Voláteis - COVs, de

origem biogênica e antropogênica, são emitidos anualmente para a atmosfera. Entretanto, a emissão dos biogênicos é sete vezes maior, sendo as florestas tropicais as maiores e principais fontes (Guenther *et al.* 1995; 1999).

Entre os catalisadores da formação de O₃ está o CO. Sabe-se que o aumento nas concentrações de CO sugere acréscimo nas concentrações de O₃ (Kirchhoff 1996; Boian *et al.*, 2006). Este gás funciona como importante precursor das atividades humanas sendo produzido, sobretudo, quando há queima de biomassa para produção de pastos ou preparação da terra para o plantio e ainda durante a queima de combustíveis fósseis como fonte de geração de energia. A presença desse gás em concentrações acima do patamar esperado está intimamente ligada aos movimentos das massas de ar e do período de tempo compreendido entre o início e término das queimadas, pois são mecanismos que influenciam na sua dispersão (D'Amélio 2006).

Por outro lado, o CO verticalmente transportado resulta em uma vida útil mais longa dos precursores de O₃ e este também é incrementado em regiões de forte convecção na troposfera média e superior, assim influenciando diretamente o equilíbrio de radiação da Terra. Isso tem sido evidenciado por estudos recentes realizados nos trópicos, demonstrando que as atividades de convecção profunda da região transportam grande quantidade de ozônio das camadas mais altas para a baixa troposfera tropical por meio da circulação atmosférica (Betts *et al.* 2002; Sigler *et al.* 2002; Grant *et al.* 2008; Hu *et al.* 2010).

Na região compreendida pela vegetação do cerrado brasileiro, há um cenário de queima de biomassa recorrente durante o inverno, conhecidamente a estação seca. O fenômeno tem origens naturais e antropogênicas. A vegetação consiste, principalmente, de gramíneas e pequenos arbustos, que em estresse hídrico é o combustível ideal para a queima. Na estação seguinte, esta vegetação estará regenerada e apta a repetir o ciclo. Por outro lado, a contribuição antropogênica surge com a expansão da fronteira agrícola nesses ambientes. A partir daí as reações químicas em cadeia, iniciadas com o CO, produzirão mais O₃ (Kirchhoff 1996).

O O₃ formado pelas reações fotoquímicas a partir da queima de biomassa na região do cerrado brasileiro influencia não somente o ambiente local, mas provavelmente outras regiões através de transporte (Longo *et al.* 1999). Estudos realizados no Brasil Central indicaram que os gases gerados nas queimadas em suas regiões-fonte, são transportados para outros lugares, através da circulação atmosférica. O CO observado no norte do Mato Grosso e sul de Goiás, durante o experimento, recebeu um incremento de até 70% no volume esperado em suas concentrações (Aires & Kirchhoff 2001).

O fenômeno das queimadas é, talvez, o mecanismo principal que consolida as mudanças de uso da terra, tanto na região do Cerrado como na Amazônia. A queima de biomassa para a agricultura seja ela familiar ou de longa escala, e para a pecuária, apresentam dinâmicas diferentes. Enquanto, o ápice das queimadas na região central do Brasil é observado nos meses de agosto e setembro, o máximo dos focos na região equatorial (leste do estado do Pará e a porção oeste da região Nordeste do Brasil) é sentido nos meses de outubro e novembro, com defasagem em relação ao Brasil Central (Aires & Kirchhoff 2001; Boian *et al.* 2006). Entre os seus impactos ambientais, as queimadas liberam grandes quantidades de monóxido de carbono (CO) na atmosfera, o qual reage com outras espécies químicas favorecendo a produção de ozônio (Kirchhoff 1996).

Na Amazônia, fontes e sumidouros ainda são difíceis de serem estabelecidos. Eles parecem estar vinculados à época do ano e às atividades antropogênicas, no que tange à queima de biomassa. Um experimento de campo realizado na floresta tropical próximo à Manaus obteve medidas que indicam ser a superfície um sumidouro de O₃, sobretudo, em momentos de atividades convectivas, quando fora observado um forte incremento na deposição das concentrações. Entretanto, o dossel da floresta, também, funciona como sumidouro, cujo depósito ocorre muito rapidamente, confirmando, então um gradiente negativo de O₃ em direção a superfície, reforçando maior perda por deposição e menor atividade fotoquímica (Kirchhoff 1988; Moura *et al.* 2004).

Outras campanhas foram realizadas por aeronaves ou radiossondas com o propósito de medir as concentrações de O₃ na troposfera. Os resultados destas campanhas relatam concentrações maiores de O₃ em níveis superiores aos esperados para o hemisfério sul,

provenientes de transporte, assim como indicam que os valores atribuídos estão de acordo com o sistema de circulação de alta pressão na região central do Brasil, nos meses de inverno austral, mantido pelas fontes de queima de biomassa (Longo *et al.* 1999).

Nos experimentos realizados na Amazônia Central e Ocidental os valores encontrados são inferiores às outras observações brasileiras, sugerindo deposição de O₃ a partir do dossel da floresta até a superfície, em valores crescentes para baixo, caracterizando o solo como sumidouro desse gás. É possível que na estação chuvosa, a floresta funcione como sumidouro, porém na estação seca deve ter sinal contrário, visto que há maior disponibilidade de radiação e precursores oriundos da queima de biomassa, que participam da fotoquímica atmosférica (Kirchhoff 1988; Moura *et al.* 2004). Mas, as mudanças de uso da terra fazem significativa diferença entre a definição do que é fonte ou sumidouro (Rummel *et al.* 2007).

Com o advento de sensores orbitais de última geração, tem-se a oportunidade de monitorar a concentração de gases, em grande escala, a partir de informações de satélites ambientais. Nos últimos anos, esforços têm se concentrado no desenvolvimento de sistemas de sondagem com alta resolução espectral, por exemplo, o “*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*” - IASI (possuindo mais de 8000 canais espectrais) e o “*Atmospheric Infrared Sounder*” – AIRS (com 2378 canais). O AIRS foi o primeiro sondador avançado de radiação infravermelha operacional com essa característica, lançado em maio de 2002 a bordo da plataforma AQUA (Aumann *et al.* 2003).

Diversos trabalhos têm buscado avaliar a qualidade das estimativas remotas de concentração de ozônio a partir de medições com radiossondagens, nos dois hemisférios. Estes trabalhos têm mostrado que as estimativas do sensor AIRS, em versões anteriores, são confiáveis apenas na região compreendida pela alta troposfera e baixa estratosfera (Gettelman *et al.* 2004; Monahan *et al.* 2007; Bian *et al.* 2007). Mais recentemente, um estudo de avaliação da qualidade das estimativas do perfil de ozônio próximo à superfície para um novo conjunto de dados, na versão 5, constatou que o viés não ultrapassou 20% nos dados estimados para os sítios validados. Entretanto, esse estudo foi categórico ao afirmar que a principal vantagem dessa nova versão é a capacidade tecnológica para identificar tendências e

padrões de sazonalidade, embora apresente uma sutil deficiência capaz de subestimar os valores totais nos trópicos (Divakarla *et al.* 2008).

Com relação à concentração de CO, alguns estudos (McMillan *et al.* 2005 e Yurganov *et al.* 2008) mostraram a possibilidade de utilizar o sensor AIRS para estimá-la na troposfera e monitorar possíveis variabilidades diárias na concentração desse gás, uma vez que o satélite *AQUA* possui cobertura global diária. Desta forma, espera-se que este trabalho contribua para validar as estimativas de sondagens remotas da plataforma *AQUA* como eficientes no monitoramento das anomalias das concentrações de ozônio troposférico, particularmente, devido às queimadas na região, uma vez que o incremento nas concentrações de CO, avaliados em medidas pontuais, incrementam as concentrações de O₃.

3.1 Dinâmicas de Formação e Extinção de Ozônio na troposfera

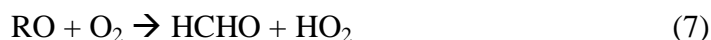
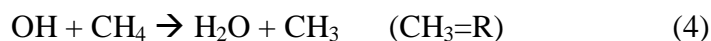
O ozônio na troposfera apresenta um ciclo de formação e extinção, cuja dinâmica é catalisada por precursores. Esses precursores podem ser de origem biogênica ou antropogênica. De maneira geral sabe-se que o radical hidroxila (OH) é o principal condutor dos processos fotoquímicos devido, sobretudo, a sua alta instabilidade. Entretanto, durante a noite a dinâmica é conduzida pelo radical nitrato (NO₃). O radical hidroxila é formado através da reação fotolítica com compostos da família do hidrogênio, como HO₂ e H₂O₂, mas surge, principalmente, das reações com vapor d'água (H₂O) (Logan *et al.* 1981; Martins 2006; Trebs *et al.* 2012).



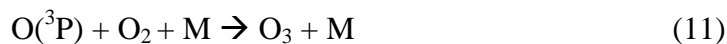
Na presença de Compostos Orgânicos Voláteis – COVs, cujas principais fontes são as florestas tropicais e os processos antropogênicos que fazem uso da produção, transporte, armazenamento e queima de combustíveis fósseis, a dinâmica do O₃ é iniciada com o radical hidroxila (OH). Contudo, um estudo recente que avaliou o impacto da taxa de mistura de gases-traço próximos à superfície na pluma urbana de Manaus a partir de observações realizadas no Rio Negro concluiu que as emissões biogênicas de isopreno parecem ter um

efeito menor do que o esperado nas remoções do radical hidroxila (OH), pois as concentrações desse COV medido e/ou estimado na camada limite convectiva apresentaram magnitude superior à descrita nos modelos da química atmosférica existentes (Triebes *et al.* 2012).

De qualquer forma, o radical hidroxila (OH) reage mais rapidamente com o CO e o CH₄, entre outros hidrocarbonetos.



As combinações reativas que produzem ozônio a partir da fotólise de NO₂ têm como rápida fonte de conversão de NO em NO₂, sendo emitido em processo em que há queima. Quando o NO reage com O₃ resulta em equilíbrio ilustrado nas equações (10), (11) e (12).



4. DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as áreas de estudo, suas características e limites geográficos, assim como os dados utilizados. Por fim, conterà uma descrição dos procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento do presente trabalho.

4.1 ÁREAS DE ESTUDO

O presente trabalho compreendeu a análise em duas grandes áreas do Brasil, cujas realidades apresentam impactos diversificados em relação ao uso da terra. Foi estudada uma área quadrada de 5°x5° de latitude e longitude do cerrado brasileiro, centrada sobre a cidade de Sinop-MT (11°S e 56°W); uma área quadrada de 5°x5° de latitude e longitude da Amazônia Ocidental, cujo centro está localizado nas coordenadas geográficas (2,5°S e 66°W). Além disso, foi estudada, também, uma área quadrada de 3°x3° de latitude e longitude sob forte urbanização e pressão humana, centrada sobre a cidade de Manaus-AM (3°S e 60°W). Dessa forma, objetivou-se encontrar resultados associados para cada paisagem específica: zona de pecuária ou agricultura intensiva e floresta, mas também, uma submetida a um elevado grau de urbanização.

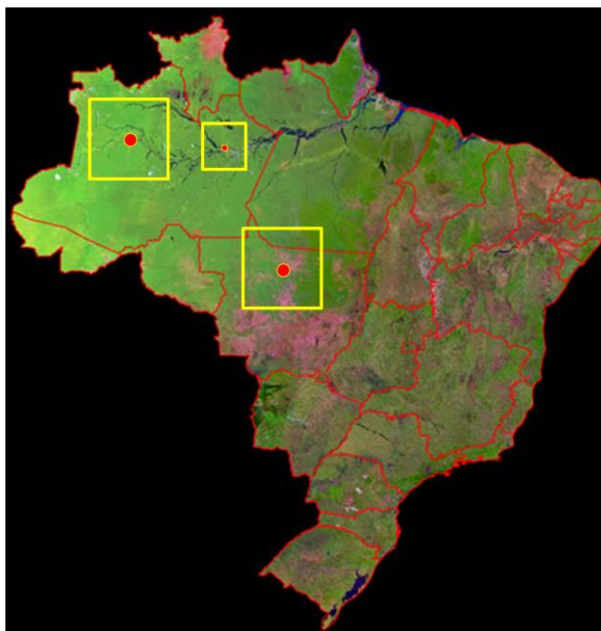


Figura 4.0. Áreas de estudo: em destaque círculo vermelho do município de Tefé, Sinop, e Manaus, quadrados de aproximadamente 250.000 e 90.000 km², respectivamente.

Para compor a região de floresta, foi delimitada uma área quadrada na Amazônia Ocidental (Figura 4.1), cujo centro está sobre as coordenadas geográficas (2,5°S e 66°W) próximas ao município de Tefé-AM. Essa região apresenta clima tropical úmido com altos índices de precipitação anual (em torno de 2800 mm) e temperatura elevada. A densidade populacional é pouco expressiva e não ultrapassa 3 hab/km².



Figura 4.1. Estado do Amazonas: em destaque (vermelho) o município de Tefé, ponto os arredores da área de um quadrado de aproximadamente 250.000 km².

Na região do Cerrado brasileiro (Figura 4.2) foi delimitada uma área que é ativa contribuinte dos episódios de queima de biomassa, dentro da fronteira agrícola, a fim de representar a região de pastagem. O clima é o tropical semiúmido, com precipitação média em torno de 1900 mm anuais e estação seca muito bem definida. O município de Sinop (11°S e 56°W) é o centro do quadrado de 5°x5° de latitude e longitude, possui uma área de 3.194 km² e uma população de aproximadamente 110.000 habitantes (IBGE, 2010). O setor agropecuário é considerado a sua principal atividade econômica, com destaque para o cultivo de grãos (soja, milho e arroz), mas também há forte desenvolvimento de atividades pecuaristas (bovinos e suínos), além da presença da indústria, sobretudo, a madeireira.



Figura 4.2. Estado do Mato Grosso: em destaque (vermelho) o município de Sinop, ponto central da área de um quadrado de aproximadamente 250.000 km².

A Figura 4.3 ilustra a área quadrada de 3°x3° de latitude e longitude, cujo centro está sobre Manaus-AM (3°S e 60W) e comporá a região Metropolitana de Manaus, área sob forte urbanização. A Região Metropolitana de Manaus reúne oito municípios em processo de conurbação e foi criada pela Lei Complementar Estadual nº 52 de 30 de maio de 2007, sendo formada por oito municípios. Tem uma área de aproximadamente 111.000 km² e pouco mais de 2.100.000 habitantes (IBGE 2010). O clima é tropical úmido com elevadas temperaturas e altas taxas de umidade, mas pouca amplitude térmica. A precipitação média anual é de 2300 mm. A região apresenta uma estação seca definida, compreendida entre os meses de julho a setembro (Fish 1990; Fish *et al.* 1998).



Figura 4.3. Região Metropolitana de Manaus: área com de aproximadamente 90.000 km² e 8 municípios.

4.2 DADOS

No presente estudo foram utilizadas as estimativas das concentrações diárias de ozônio e monóxido de carbono, sobre as três diferentes áreas de estudo (floresta, pastagem e Manaus), estimados a partir do sistema de sondagem do satélite *AQUA* (versão 5), estratificado em três níveis de pressão atmosférica. As séries diárias de concentração de gases correspondem ao período de 2003 a 2010. Entretanto, há na série temporal, a ausência de informações para 21 dias seguidos para o ano de 2003 (de 29/10/2003 a 18/11/2003) e 17 dias para o ano de 2010 (09.01.2010 a 26.01.2010). Estes dados foram obtidos no portal da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), no seguinte endereço eletrônico: <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/homepageAlt.pl?keyword=AIRX2SUP>.

Além disso, foram utilizados dados mensais de precipitação do GPCC (“*Global Precipitation Climatology Center*”). Esses dados representam uma combinação de dados estimados por satélites e dados observados em estações convencionais em superfície. Para compor a climatologia do período foram utilizados dados de 1986 a 2010, sobre as áreas estudadas.

Finalmente, foram utilizados os dados dos focos de queimadas identificados a partir de informações conjuntas de todos os satélites, sobre as áreas estudadas, os quais estão disponíveis no portal eletrônico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no seguinte endereço eletrônico: “<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>”.

4.3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida em três etapas, conforme descrito na Figura 4.4. Os arquivos HDF disponibilizados no site da NASA foram lidos através do uso de ferramenta computacional para compor as séries temporais.

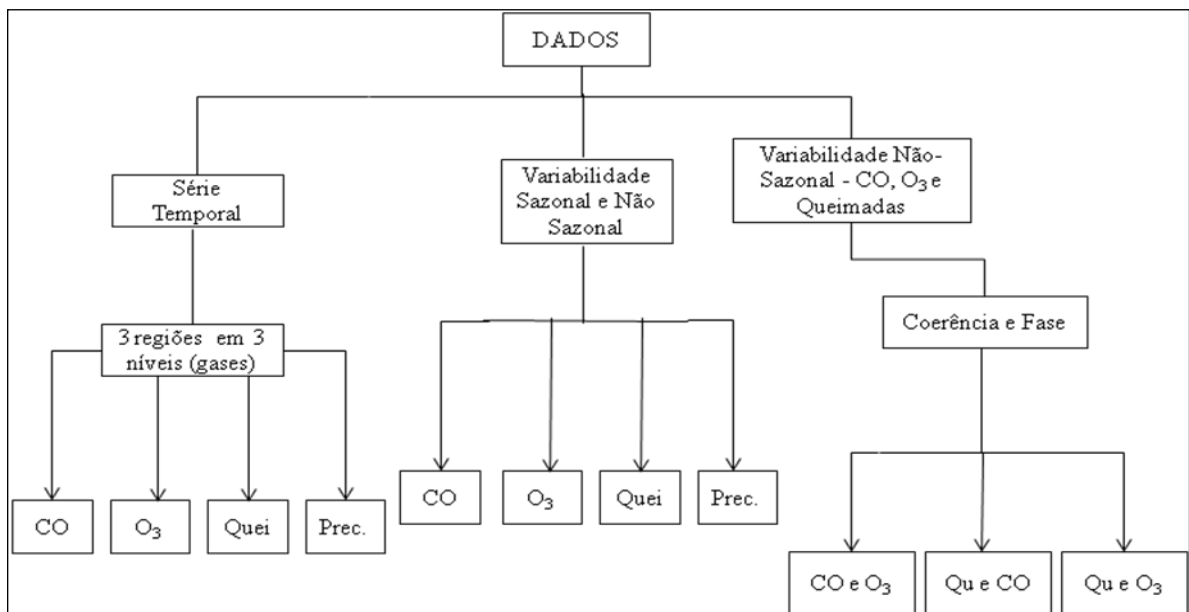


Figura 4.4: Etapas do processo metodológico

A primeira etapa consistiu na leitura dos arquivos HDF a fim de encontrar as séries temporais das concentrações dos gases e anomalias, mas também queimadas e precipitação.

Inicialmente foram analisadas as séries de concentração de gases (O_3 e CO) estimadas pelo sistema de sondagem *AQUA*, sobre a região de floresta, pastagem e Manaus, para três diferentes níveis de pressão na troposfera (500mb, 750mb e 850mb), o que corresponde a aproximadamente 5km, 2km e 1,5km de altitude, respectivamente. As concentrações diárias de O_3 e CO em três níveis de pressão foram obtidas a partir da média sobre cada uma das áreas de estudo, considerando também uma média na vertical, extraíndo-a de cinco níveis de pressão, sendo dois imediatamente acima e dois abaixo, cujo centro foi o nível desejado.

As séries temporais diárias compõem um vetor equivalente ao número de dias para o período. Entretanto, em razão da cobertura remota não atingir todos os pontos de grade da área de estudo diariamente, algumas linhas (dias) do vetor não receberam dados. A fim de solucionar essa questão, essas lacunas foram preenchidas obtendo-se a média aritmética simples dos dados das linhas imediatamente anterior e posterior. Assim, para a região de floresta e pastagem foram interpolados quase 14% dos dados da série temporal para complementar a dimensão da série histórica, nos dias em que o satélite não cobriu nenhum ponto da área de estudo. Entretanto, para a região de Manaus, essa interpolação aproximou-se de 20% da série. Contudo, restou ainda, ausência de dados, não interpolada, para uma seqüência de 21 dias do ano de 2003 (de 29/10/2003 a 18/11/2003) e 17 dias do ano de 2010 (09/01/2010 a 26/01/2010), visto não terem sido disponibilizados arquivos HDF pela NASA para esse intervalo de tempo.

A fim de construir a série de queimadas coletou-se no site do INPE o número de focos diários combinando todos os satélites ambientais disponíveis, para todas as áreas de estudo. Com relação aos dados de precipitação, fez-se uso dos dados mensais do GPCC (Rudolf e Rubel, 2005), onde foram extraídas médias do período compreendido entre 1986 e 2010 para cada área de estudo.

A segunda etapa consistiu na interpretação da escala de distribuição sazonal para a série de gases, queimadas e precipitação. Os padrões sazonais dos gases foram calculados com a finalidade de identificar os padrões médios característicos associados aos períodos seco e chuvoso da região conforme Fish (1990) e Fish *et al.* (1998). Nessa fase foram analisadas as sazonalidades das séries em todos os níveis de pressão para as áreas de estudo. Ainda, uma

análise exploratória dos dados utilizados no presente trabalho foi realizada utilizando o diagrama de caixa “box plot”. O diagrama de caixa tem a finalidade de fornecer informações sobre as características de posição, dispersão, assimetria, comprimento das caudas e valores extremos de um conjunto de dados (Bussab e Morettin, 2002). Além disto, o “box plot” é construído com base na mediana e nos quartis associados ao conjunto de dados, o que o torna resistente a valores discrepantes dentro das barreiras de valores extremos e, conseqüentemente, atraente em análise exploratória de dados (Wilks, 2006).

As séries de anomalias dos gases foram extraídas com o objetivo de realizar análise da escala de variabilidade. Contudo para avaliar as anomalias de O₃ e CO, foram analisados somente os resultados obtidos no nível de 750mb para todas as paisagens do estudo, sobretudo, por se tratar de um nível intermediário e, por conseguinte, ter apresentado comportamento similar aos demais níveis de pressão. Em seguida foram encontradas, também, a série de anomalias diárias de queimadas e a série de anomalias mensais de precipitação, para todas as áreas de estudo, com o intuito de obter a escala de variabilidade.

Na terceira etapa, com o propósito de analisar relações entre as séries temporais de CO, O₃ e focos de queimadas, foram realizadas as análises de coerência e fase, aplicada à Transformada de Ondaleta (Torrence e Compo, 1998). Neste caso, a técnica foi aplicada às séries de anomalias de queimadas, O₃ e CO para cada área de estudo e diferentes níveis de pressão. Especificamente, a análise de coerência da ondaleta é usada para quantificar o grau de relação linear entre duas séries temporais não estacionárias no domínio da freqüência e do tempo, de forma a determinar, por exemplo, se a presença de particular freqüência dominante em um determinado período de tempo na série de O₃ corresponde à presença daquela mesma freqüência, no mesmo intervalo de tempo, para a série de CO ou de queimadas.

Por outro lado, a análise de fase do espectro cruzado da ondaleta pode determinar o tempo de separação (defasagem) entre as duas séries analisadas. Assim as análises de coerência e fase da ondaleta foram realizadas para investigar as relações entre as séries de anomalias de O₃ e as séries temporais de anomalias de outras variáveis (CO e queimadas). Desta forma, foi possível identificar as bandas de freqüência e intervalos de tempo dentro dos quais as séries temporais de O₃, de CO e/ou queimadas estão relacionadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados das análises das concentrações e anomalias de O₃ e CO, além dos focos de queimadas e precipitação sobre a região de floresta, pastagem e Manaus. Em relação às concentrações dos gases, a análise ocorrerá em três níveis de pressão – 500mb, 750mb e 850 mb, a fim de se observar a estratificação.

Analisar-se-á também, o ciclo sazonal das concentrações dos gases em todos os níveis de pressão, queimadas e precipitação e a análise de coerência entre as séries de anomalias a fim de estabelecer a relação entre CO e O₃, queimadas e CO e queimadas e O₃.

5.1- Séries temporais diárias e anomalias de O₃, CO e focos de queimadas

As séries históricas contendo os valores das concentrações diárias de O₃ para o período de 2003 a 2010, sobre a região de floresta, pastagem e Manaus, em três níveis de pressão, são apresentadas nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente. Analisando as séries dos valores diários das concentrações de O₃ observam-se as maiores concentrações no nível de 500 mb, decrescendo para os níveis de 750 mb e 850 mb.

Para a região de floresta (Figura 5.1), as médias dos máximos e mínimos foram $2,5 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm² e $1,2 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm², respectivamente. A média das concentrações máximas de O₃ representa pouco mais que o dobro da média das concentrações mínimas. Considerando os três níveis de pressão (Figura 5.1), nota-se que muito embora a série apresente um ciclo sazonal bem definido, todos os anos apresentaram máximos próximos à média, com exceção para os anos de 2008 e 2010 com valores acima da média. Quando avaliados os mínimos, observa-se pouca variação em relação à média para todos os anos da série.

Para a região de pastagem (Figura 5.2) a média das concentrações máximas foi de $2,8 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm² enquanto a média das concentrações mínimas foi de $1,1 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm². A média das concentrações máximas representa aproximadamente 3 vezes o valor da média das concentrações mínimas. Há na série um ciclo sazonal bem definido.

Observam-se que os anos de 2005 e 2010, registraram máximos acima da média e os anos de 2003 e 2004 abaixo da média. Essa paisagem apresenta a maior amplitude observada especificamente para o ano de 2010. Novamente, percebe-se que as concentrações mínimas não apresentaram variação significativa para todos os anos da série estudada. Nota-se, ainda, que as concentrações desse gás, na região de pastagem, são superiores às concentrações de floresta. Confirma-se, ainda, que as maiores concentrações são observadas no menor nível de pressão estudado, decrescendo em direção à superfície.

A Figura 5.3, apresenta as concentrações diárias de O₃ sobre a região Metropolitana de Manaus. Percebe-se um ciclo sazonal bem definido em toda a série. A média das concentrações máximas para essa paisagem foi de $2,7 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm² e a média das concentrações mínimas foi de $1,2 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm². A concentração máxima média representa um pouco mais que o dobro da concentração mínima média. Todos os anos apresentaram um comportamento em que as concentrações máximas estão próximas à média, com exceção para os anos de 2010, que ficou acima e 2003, que ficou abaixo. Os mínimos, de maneira similar às demais paisagens, apresentaram pouca ou nenhuma variação em todos os anos da série.

Observa-se ainda, no início de cada ano que a concentração de O₃ vem decrescendo, depois sobe, voltando a decrescer em seguida. Esse fenômeno, também, é observado nas concentrações da região de floresta, cuja dinâmica de queimadas, ciclo de precipitação, latitude e cobertura vegetal são parecidas à região do entorno de Manaus. Contudo, a região Metropolitana de Manaus, além das prováveis contribuições de transporte de CO, favorecido pela circulação atmosférica, provenientes de leste da área de estudo, registra forte urbanização com significativa atividade antropogênica que incrementa as emissões dos precursores de O₃. Pode ainda, estar acontecendo transporte de O₃ das camadas mais elevadas para níveis próximos à superfície, devido à convecção atmosférica, pois nessas regiões, quase não são detectados focos de queimadas nesse período. Diversos estudos realizados na região tropical por Betts *et al.* (2002), Sigler *et al.* (2002), Grant *et al.* (2008) e Hu *et al.* (2010) detectaram essa dinâmica de trocas convectivas.

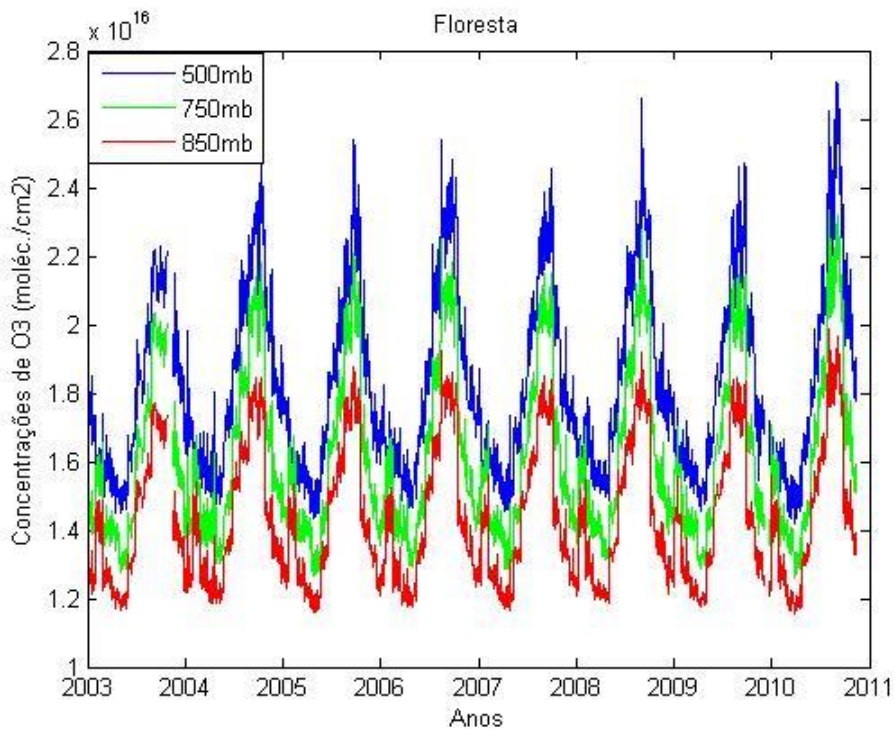


Figura 5.1 - Concentração diária de O₃ sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.

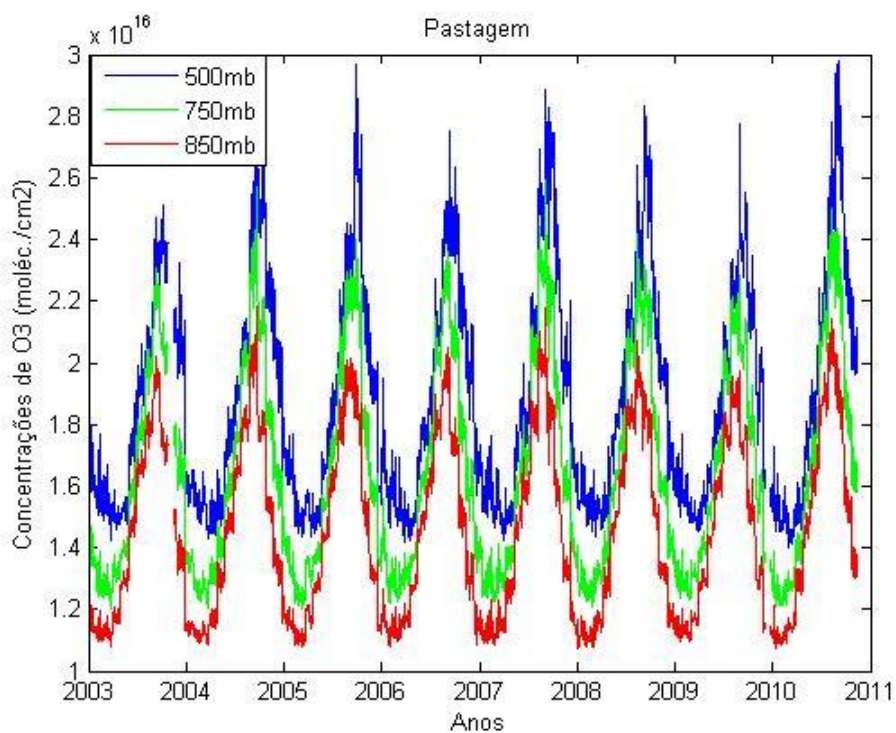


Figura 5.2 - Concentração diária de O₃ sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.

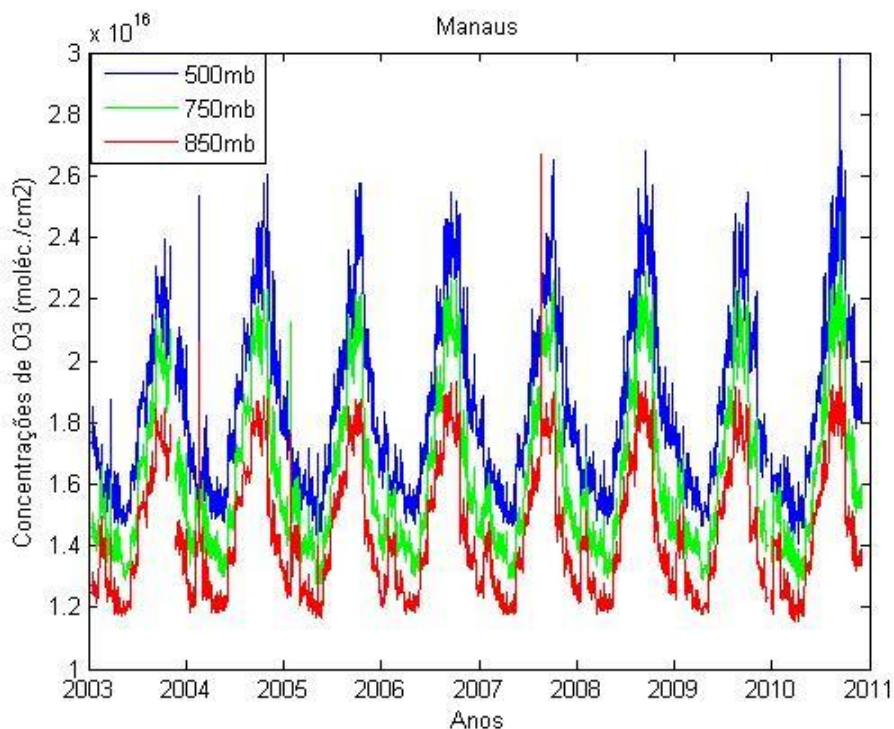


Figura 5.3 – Concentração diária de O₃ sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam as anomalias de O₃ sobre as regiões de floresta, pastagem e Manaus, para o nível de 750mb, no período correspondente entre 2003 a 2010. Para efeito dessa análise, foram utilizados apenas os resultados desse nível, em vista desse ser o nível intermediário e apresentar comportamento similar ao observado nos demais níveis de pressão de estudados.

Em relação à região de floresta (Figura 5.4) observam-se anomalias positivas no ano de 2004, 2006, 2008 e 2010. Por outro lado, os anos de 2003, 2005, 2007 e 2009 apresentam anomalias negativas dessas concentrações. Os anos de 2003 e 2009 apresentam anomalias negativas mais acentuadas aos demais anos da série.

A Figura 5.5 apresenta as anomalias de O₃ sobre a região de pastagem. Observam-se anomalias positivas e negativas se intercalando dentro do mesmo período do ano. Entretanto,

os anos de 2004, 2005 e 2007 e 2010 apresentam as anomalias positivas observadas nas concentrações desse gás, enquanto os anos de 2003 e 2009 apresentam as maiores anomalias negativas da série. O ano de 2009 apresenta anomalias positivas na primeira metade do ano, mas a partir do segundo semestre as anomalias negativas são mais acentuadas.

Analisando as anomalias de O₃ sobre a Região Metropolitana de Manaus (Figura 5.6) observa-se que há um ciclo bem definido. Os anos de 2004, 2006, 2008 e 2010 apresentam registros positivos mais intensos dessas anomalias, contudo, as mais expressivas foram observadas no ano de 2010, ano de El Niño, cujas conseqüências são reduções no volume de chuvas na região amazônica (Marengo 1992). Os anos de 2003, 2005 e 2009 registraram forte intensidade de anomalias negativas.

Quando comparadas as anomalias das três paisagens – floresta, pastagem e Manaus - observa-se uma escala de variabilidade bem definida e comportamento similar em todas as séries. As anomalias negativas de maior frequência são perceptíveis para os anos de 2003 e 2009 enquanto as positivas são notadas para o ano de 2010. Os anos de 2008 e 2009 apresentaram acréscimos nos volumes de chuva na região, pois sofreu a ação de evento de La Niña de forte intensidade, enquanto o ano de 2010 foi acometido pelo fenômeno do El Niño (Marengo 1992)

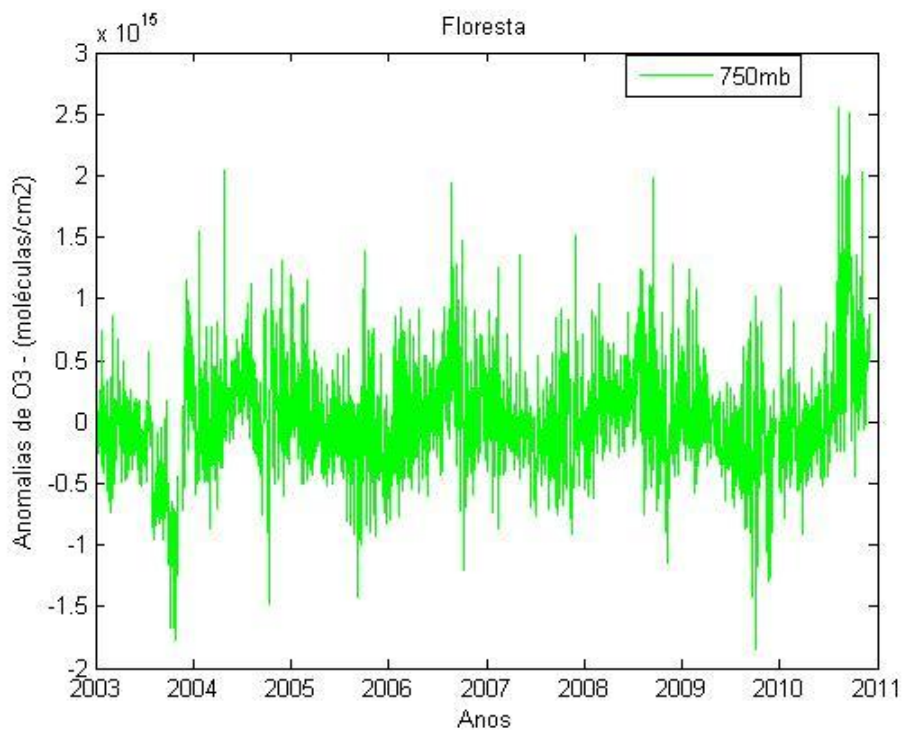


Figura 5.4 - Anomalias diárias de O₃ sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010 no nível de 750 mb.

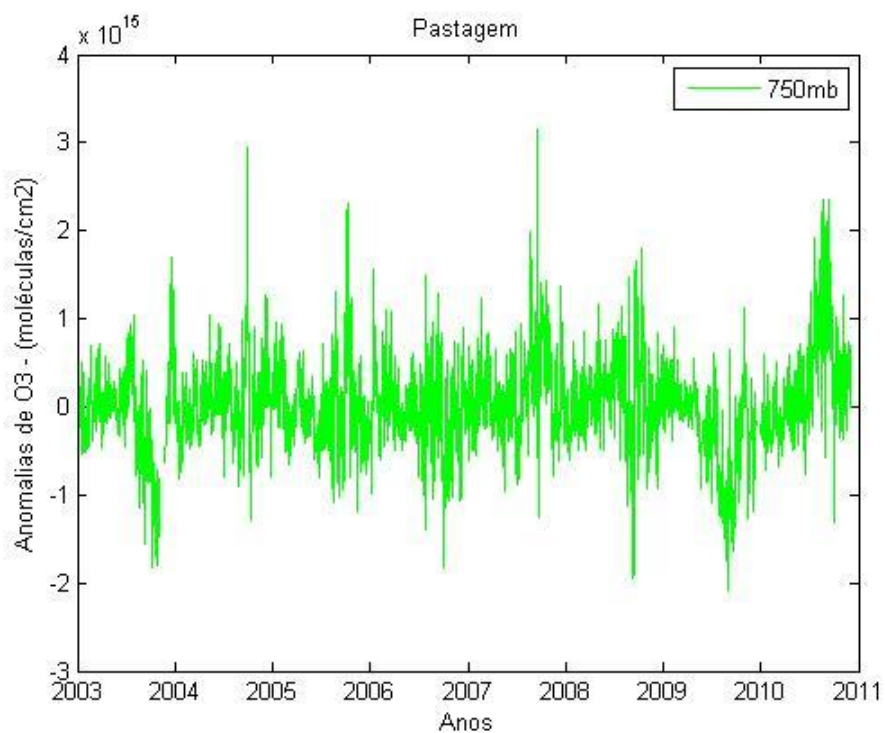


Figura 5.5 - Anomalias diárias de O₃ sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010 no nível de 750 mb.

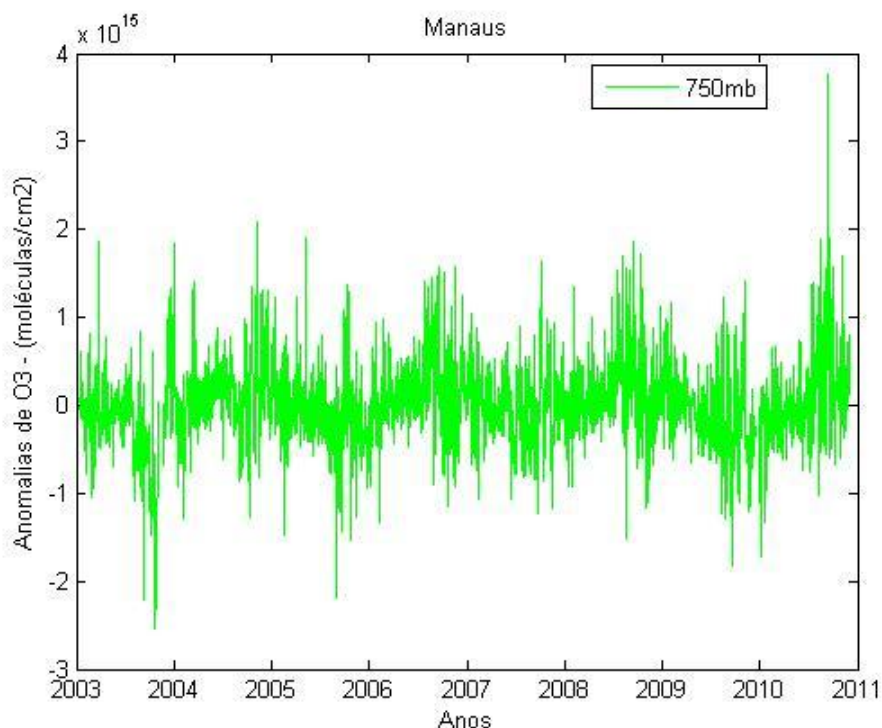


Figura 5.6 - Anomalias diárias de O₃ sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010 no nível de 750mb.

As séries históricas das concentrações diárias de CO para o período de 2003 a 2010, sobre a região de floresta, pastagem e Manaus, em três níveis de pressão, são apresentadas nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9, respectivamente. Analisando o comportamento das concentrações de CO observa-se, no entanto, um ciclo muito similar em toda a série. As concentrações de CO são maiores nos níveis próximos à superfície, em consonância com o seu perfil atmosférico. Assim, as maiores concentrações observadas estão no nível de 850 mb.

As médias das concentrações máxima e mínima, para a região de floresta, foram de $8,5 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm² e $3,4 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm². A concentração máxima média é 2,5 vezes superior a concentração mínima média. Os mínimos apresentam um comportamento em que se observa mínima variação em relação à concentração mínima média para todos os anos, entretanto, os máximos variam, de forma mais significativa muito embora a série apresente-se em ciclo regular bem definido, com maiores concentrações na estação seca da região.

Analisando a série temporal diária de CO sobre região de floresta em três níveis de pressão (Figura 5.7) pode-se observar uma sazonalidade bem definida com as maiores

concentrações registradas no segundo semestre dos anos. As maiores concentrações foram observadas nos anos de 2005, 2007 e 2010, cujas concentrações máximas foram superiores a concentração máxima média. Entretanto, os anos de 2003, 2004, 2008 e 2009 apresentaram concentrações máximas inferiores à concentração máxima média. Observa-se em toda a série um ciclo regular, cujas maiores concentrações estão dispostas nos últimos meses de cada ano. Entretanto, nos meses iniciais de cada ano, percebe-se, uma pequena elevação nas concentrações desse gás para em seguida decair e retomar o crescimento mais adiante, durante a estação seca.

A Figura 5.8 apresenta a série temporal das concentrações de CO sobre a região de pastagem, em três níveis de pressão, onde a concentração máxima média encontrada é da ordem de $1,2 \cdot 10^{17}$ moléculas/cm² e a concentração mínima média é de $3,1 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm². A relação entre os extremos médios foi a mais expressiva entre as paisagens estudadas. A concentração máxima média corresponde a quase 4 vezes a concentração mínima média.

As maiores concentrações na região de pastagem foram observadas no ano de 2010 seguidas pelos anos de 2004, 2005 e 2007, cujos valores foram superiores a concentração máxima média. As menores concentrações foram observadas nos anos de 2003, 2008 e 2009. As concentrações de CO observadas na região de pastagem (Figura 5.8) são mais acentuadas que as apresentadas na região de floresta e Manaus (Figuras 5.7 e 5.9) e a concentração máxima média chega a representar quase 1,5 vezes a concentração máxima média das outras paisagens.

No que tange às concentrações de CO sobre a região Metropolitana de Manaus (Figura 5.9), percebe-se que as maiores concentrações foram registradas para os anos de 2004, 2005, 2007 e 2010, tendo esses anos apresentado máximos de suas concentrações superiores a concentração máxima média, que foi da ordem de $8,5 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm². Os anos de 2003, 2008 e 2009, apresentaram concentrações máximas inferiores a concentração máxima média. Percebe-se, ainda, que os mínimos não sofrem grande variação das concentrações, apresentando-se com certa regularidade e mantendo-se próximos a concentração mínima média, que foi de $3,3 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm².

Observa, também, que na região Metropolitana de Manaus as estimativas de concentração desse gás mantêm um ciclo bem definido. Os valores e o comportamento das concentrações de CO apresentados na região de Manaus são similares às concentrações observadas na região de floresta, mas com valores mais elevados. As duas regiões estão na mesma latitude e têm a mesma cobertura vegetal no entorno, entretanto, com desenvolvimento de atividades humanas em grau diferente, vez que Manaus é densamente povoada e apresenta elevada taxa de urbanização.

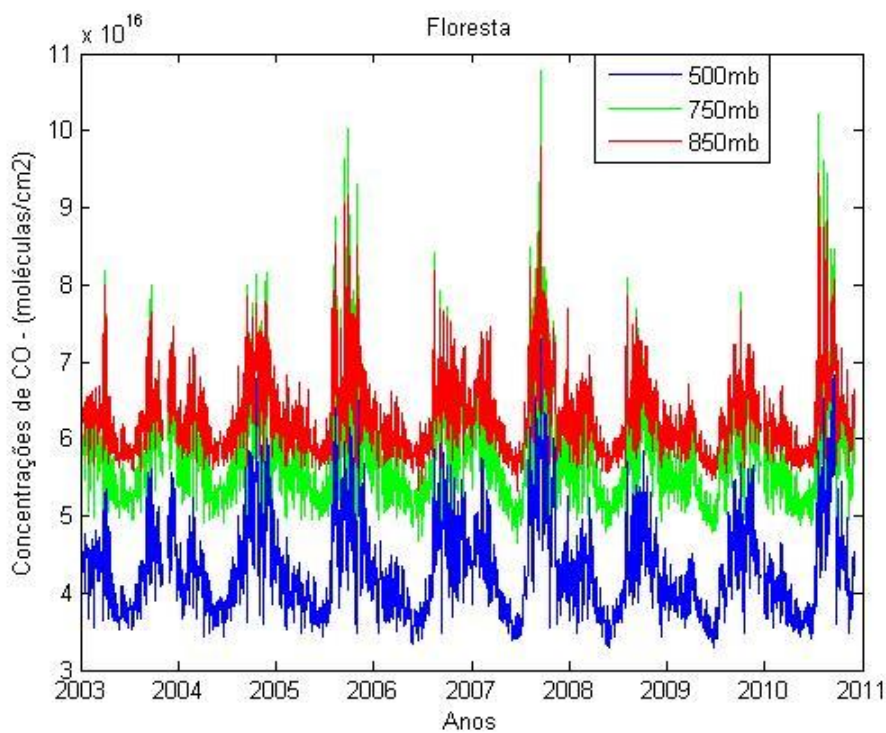


Figura 5.7- Concentração diária de CO sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.

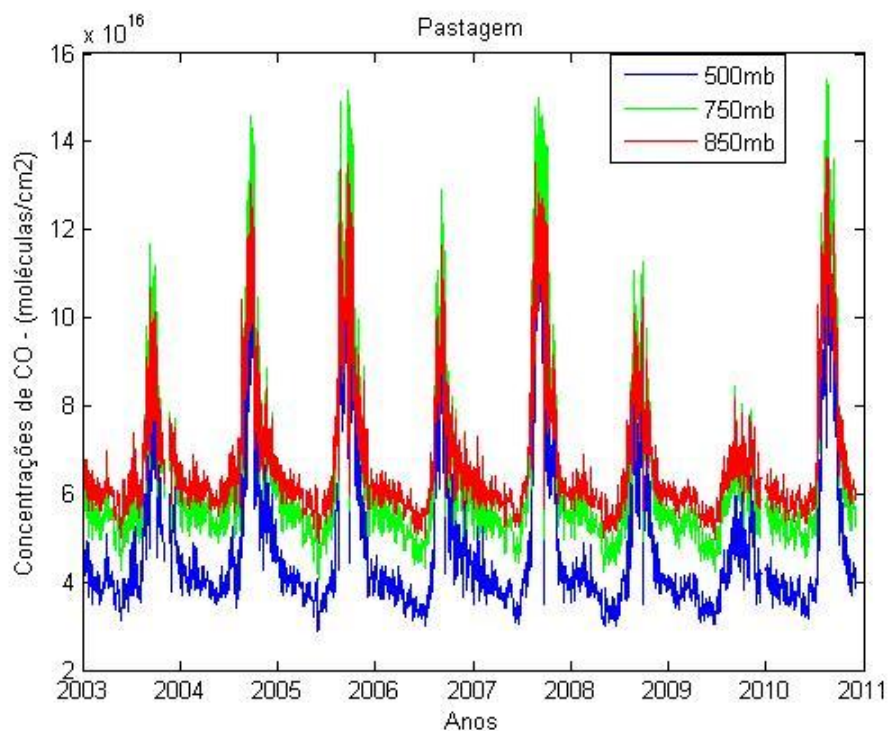


Figura 5.8 - Concentração diária de CO sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.

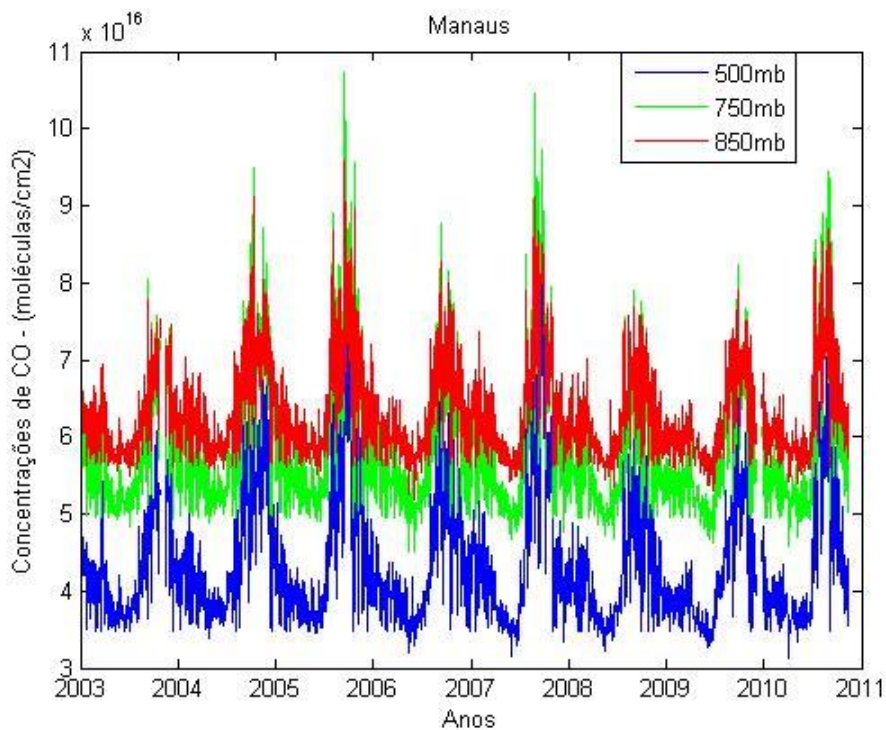


Figura 5.9 - Concentração diária de CO sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010 em três diferentes níveis de pressão.

Analisando as anomalias de CO sobre a região de floresta (Figura 5.10) observa-se que os anos de 2005, 2007 e 2010 apresentaram as anomalias positivas mais significativas. Foram

observadas, também, anomalias negativas em todos os anos da série estudada, porém, nos anos de 2003, 2006, 2008 e 2009 eles se apresentaram de forma mais acentuada em relação aos demais anos. Sempre ao final de cada ano, as anomalias negativas são observadas quando se inicia o período das chuvas e ocorre redução dos focos de queimadas.

A Figura 5.11 apresenta as anomalias de CO sobre a região de pastagem deixando perceptível que as anomalias positivas acentuadas foram observadas nos anos de 2004, 2005, 2007 e 2010. As mais significativas anomalias negativas são observadas para os anos de 2003, 2006, 2008 e 2009. Em 2008 ocorreu forte evento de La Niña que resultou em aumento nos volumes e intensidade de precipitação, cujos acumulados mantiveram-se acima da média climatológica do período. Conseqüentemente a frequência e a intensidade dos focos de queimadas foram reduzidos. Entretanto, foi relevante também, a amplitude das anomalias negativas observadas nos anos de 2003, 2006.

As anomalias de CO da região de Manaus são apresentadas na Figura 5.12. Elas apresentam um comportamento similar ao da região de pastagem. As maiores amplitudes e frequências das anomalias positivas foram registradas para os anos de 2005, 2007 e 2010, cujos volumes de precipitação observados foram reduzidos devido ao fenômeno de El Niño, fenômeno responsável pela redução dos acumulados de precipitação resultando no aumento do volume e frequência dos focos de queimada na região (Marengo 1992).

O ciclo sazonal aqui observado é similar ao encontrado na região de floresta. Entretanto, os picos de concentrações da região de Manaus são sensivelmente superiores aos encontrados na região de floresta, embora com frequências e amplitudes muito similares, sugerindo que as concentrações desse gás podem ser incrementadas pelas atividades antropogênicas, uma vez que se trata de região densamente urbanizada sob forte pressão humana, ou ainda, pelo transporte favorecido pela circulação atmosférica oriundo de leste da região de estudo.

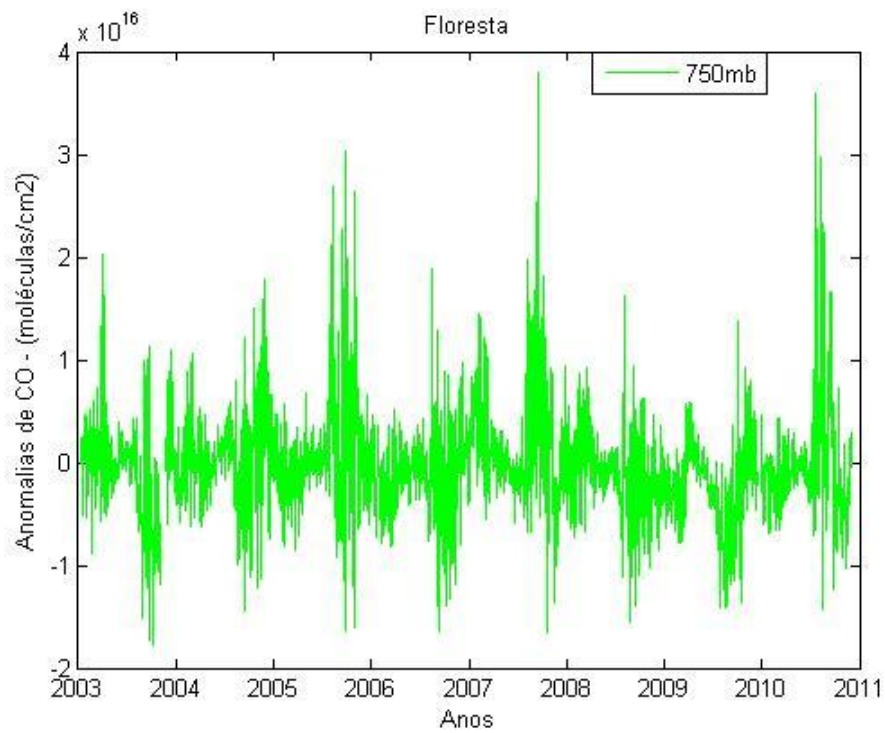


Figura 5.10 - Anomalias diárias de CO sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010 no nível de 750mb.

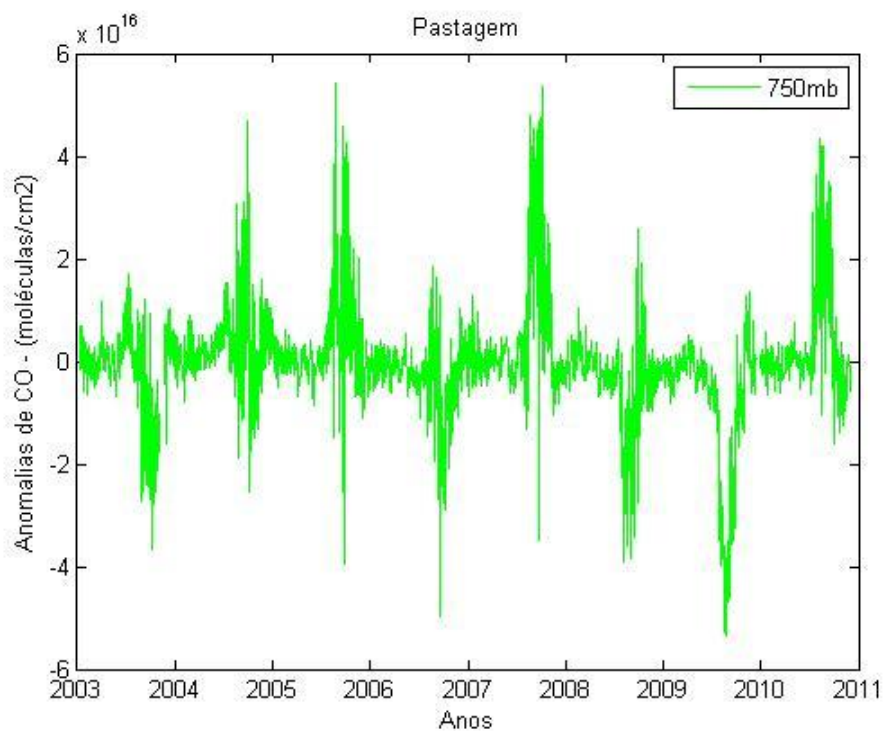


Figura 5.11 - Anomalias diárias de CO sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010 em três níveis de pressão

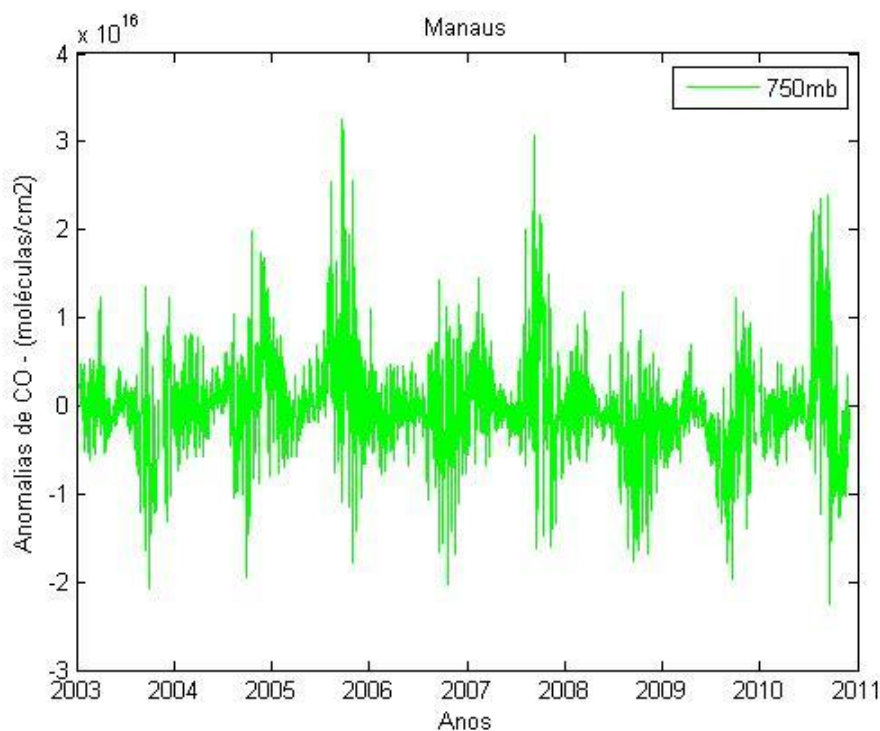


Figura 5.12 - Anomalias diárias de CO sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010 em três níveis de pressão.

Observa-se, na análise das concentrações de CO e O₃ sobre as três paisagens estudadas, nos três níveis de pressão, que os resultados estão em consonância com a literatura, conforme apresentado por Kirchhoff (1988; 1990; 1996). Segundo o autor, o incremento nas concentrações de CO pode promover incremento nas concentrações de O₃, sendo o O₃ um poluente secundário gerado, sobretudo, quando da disponibilidade de CO, hidrocarbonetos, radiação solar e vapor d'água em abundância.

A região do equador terrestre apresenta as maiores concentrações de O₃ troposférico, sobretudo, porque recebe elevada potência de energia solar e contém significativos volumes de vapor d'água na atmosfera. Provavelmente por isso, percebe-se que as concentrações de O₃ são mais significativas para a região de floresta. Ressalta-se ainda que a cobertura vegetal preservada seja grande fonte emissora de Compostos Orgânicos Voláteis – COV's, entre eles, o isopreno (C₄H₈), cujas emissões biogênicas em contato com os outros catalisadores contribuem para o processo de produção e extinção de O₃, de acordo com Logan (1986).

Analisando as séries temporais, para ambos os gases, nota-se que nos meses iniciais de cada ano há uma pequena elevação nas concentrações desses gases para em seguida decair e retomar o crescimento mais adiante, durante a estação seca. Esse fenômeno é perceptível para as paisagens de floresta e Manaus, cujo entorno das áreas estão na mesma latitude, sendo de floresta tropical, o que sugere o transporte de leste das áreas de estudo, cujo comportamento das queimadas regionais é distinto da dinâmica temporal das queimadas do Brasil Central, pois ocorre defasado em alguns meses. Quando nos meses de outubro e novembro, o Brasil Central já apresenta relativa significância na redução dos focos de queimadas, o leste do Pará e adjacências ainda queimam significativamente, em conformidade com estudo realizado por Aires e Kirchhoff (2001) que analisa o transporte de CO oriundo de queimadas para regiões onde há pouca ou nenhuma queima. Em outros estudos realizados por Kirchhoff (1996), Betts *et al.*(2002), Sigler *et al.*(2002), Grant *et al.*(2008) e Hu *et al.*(2010) observou-se há trocas convectivas de O₃ entre a estratosfera e troposfera. Sendo assim, o aumento de O₃ pode ser devido a dois fatores principais: fotoquímica e/ou transporte de níveis mais altos.

Analisando a série temporal diária de queimadas da região de floresta (Figura 5.13) observa-se que os focos identificados sobre essa região foram mais frequentes no ano de 2009, quando houve registros superiores a 400 focos. Posteriormente, os anos de 2005, 2006, 2007 e 2010 sucederam o ano de 2009 e apresentaram números próximos a 100 focos. Contudo, o ano de 2009, apresentou comportamento diferente, pois apresentou significativa persistência no número de focos, além de um registro da ordem de aproximadamente 250 pontos para um dia da estação chuvosa.

De certa forma, a variação sazonal dos focos de queimada sobre a região de floresta é regular, confirmando que essa prática corriqueira está mais presente na estação seca e, provavelmente, associada à agricultura familiar quando são observadas maiores frequências dos focos. Por outro lado, as concentrações de CO observadas podem não encontrar justificativa apenas na queima de biomassa local. Assim, as concentrações desse gás devem ser incrementadas provavelmente por transporte, oriundo, sobretudo de leste da área de estudo, graças à circulação atmosférica e dinâmica de queimadas regional.

Em relação aos focos de queimadas observados na região de pastagem (Figura 5.14) percebe-se que a distribuição dos focos apresenta elevados números e frequência de queimadas para todos os anos da série. O ano de 2007 registrou em um único dia um número de focos elevado (um pouco mais de 9000). Em seguida, as maiores observações foram notadas nos anos de 2004 e 2005. Os focos de queimadas para o ano de 2009 não ultrapassou o montante de 1000. Posteriormente, em ordem crescente de valores, foram observados os anos de 2008, 2010, 2003 e 2006, cujas frequências dos focos não atingiram nem a terça parte da intensidade observada no ano de 2007. No entanto, deve-se observar que o número de focos de queimadas não dá a idéia sobre a intensidade das queimadas.

No que concerne à dinâmica das queimadas, observa-se na série uma distribuição regular, onde o maior número de focos é contado na estação seca, nos meses compreendidos entre agosto e outubro, sendo setembro o mais expressivo. Durante a estação chuvosa, os focos de queimadas diminuem de forma acentuada.

Quando comparados os focos de queimadas com as concentrações de CO sobre a região de pastagem, observa-se uma boa concordância entre as séries, sugerindo que a queima de biomassa local incrementa as concentrações desse gás, caracterizando-o como um importante indicador das atividades humanas, como também observado por Kirchhoff (1988; 1990; 1996).

Com base na Figura 5.15, pode-se inferir da série de queimadas sobre a região Metropolitana de Manaus que há um ciclo bem definido, cuja amplitude é similar à região de floresta. Entretanto, o número de focos é superior, sugerindo que as concentrações de CO, além de serem incrementadas pelo transporte desse gás de leste da região de estudo, pertencente ao arco do desmatamento, também, pode receber incrementos promovidos pelas atividades humanas, vez que a área em questão, de expressiva urbanização e conseqüentemente, forte queima de combustíveis fósseis, representa apenas 60% da área de floresta. Em regiões onde as atividades humanas são intensas, o incremento de catalisadores é maior, proporcionando, portanto, maiores concentrações de O₃, como sugerido por Longo *et. al.* (1999).

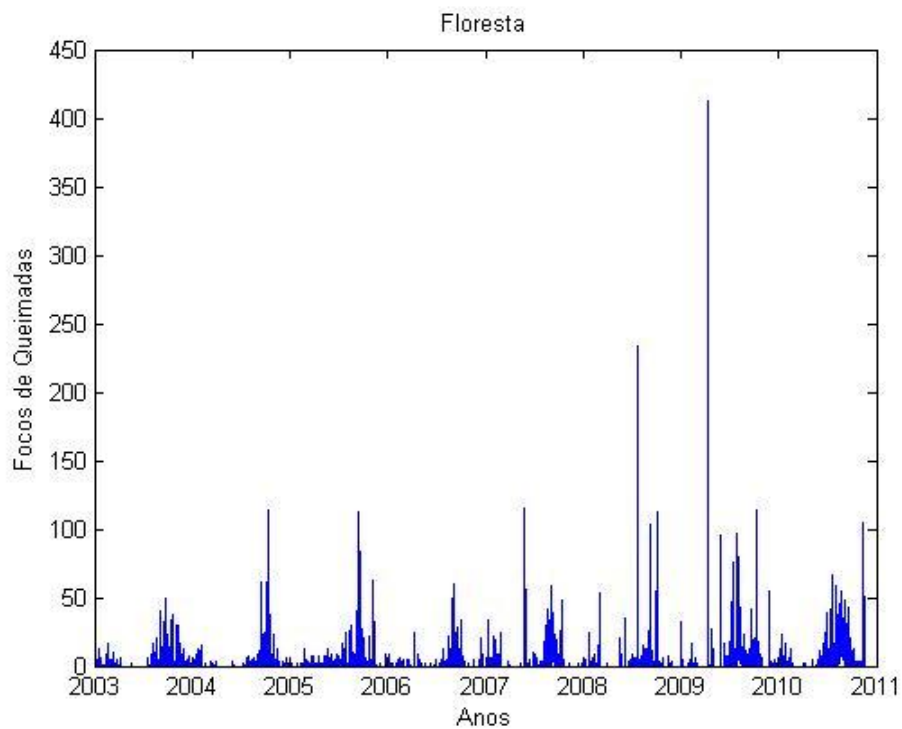


Figura 5.13 – Série temporal diária de focos de queimadas sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010.

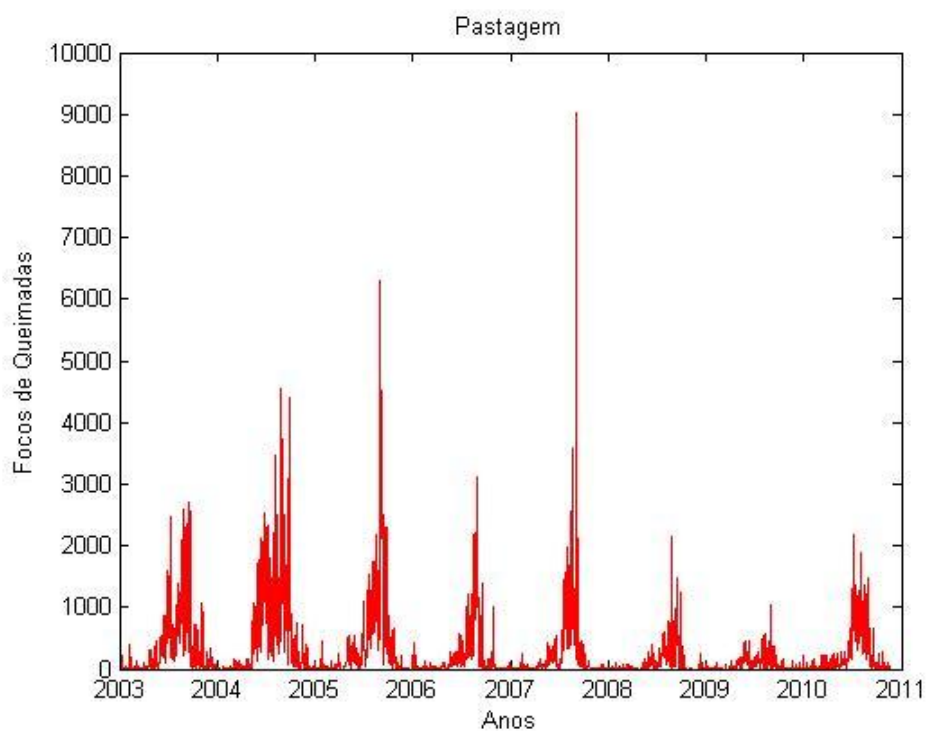


Figura 5.14 – Série temporal diária de focos de queimadas sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010.

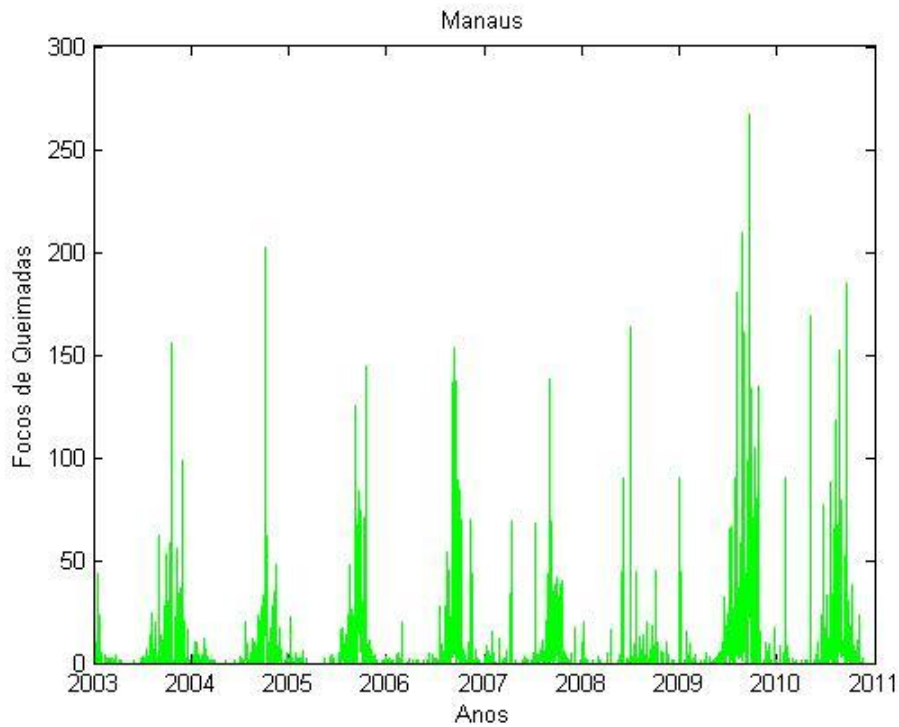


Figura 5.15 – Série temporal diária de focos de queimadas sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010.

As séries de anomalias de queimadas para as regiões de floresta, pastagem e Manaus são apresentadas nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18, respectivamente. Referente às anomalias sobre região de Floresta (Figura 5.16) é possível afirmar que o ano de 2009 apresentou a maior frequência de dias com mais de 100, sendo seguido pelo ano de 2008 (mais de 200) e posteriormente os anos de 2005 e 2007, que apresentaram comportamento similar, em torno de 100 focos. Vale observar que o ano de 2010 mesmo não apresentando dias com número de focos maiores que 100, mostrou persistência no número de dias com queimadas.

Quanto às anomalias de queimadas sobre região de pastagem (Figura 5.17) observa-se que as anomalias positivas foram bem perceptíveis nos três primeiros anos da série, sendo o ano de 2007 que apresentou o maior número de focos. Posteriormente, destaca-se o ano de 2005. Da mesma forma, com características de anomalias positivas mais acentuadas, percebem-se os anos de 2003 e 2004. Os anos de 2008 e 2009, apresentaram quase que na totalidade, anomalias negativas, cujos valores ficaram próximos de 1500 focos abaixo em

relação à média climatológica de queimadas do período estudado. Essas anomalias foram persistentes e significativas.

A Figura 5.18 apresenta as anomalias observadas sobre a região de Manaus. No final do ano de 2009 e início de 2010 foram observadas as maiores anomalias positivas da série, de aproximadamente 200 focos. Logo após, com registro da ordem de mais de 150 focos, destacou-se o ano de 2005. No ano de 2008 predominou as anomalias negativas. No ano de 2010, observa-se também, anomalias positivas da mesma grandeza que 2008. As anomalias positivas, de forma geral, foram mais pronunciadas que as negativas.

Todos os anos da série apresentaram anomalias negativas, entretanto, no ano de 2009 elas foram menos intensas. Durante esse ano, as anomalias negativas, foram observadas em curtos períodos de tempo e com baixa amplitude. O comportamento das anomalias de queimadas na região de Manaus foi similar ao da floresta, entretanto, as variações observadas foram menor nessa última paisagem.

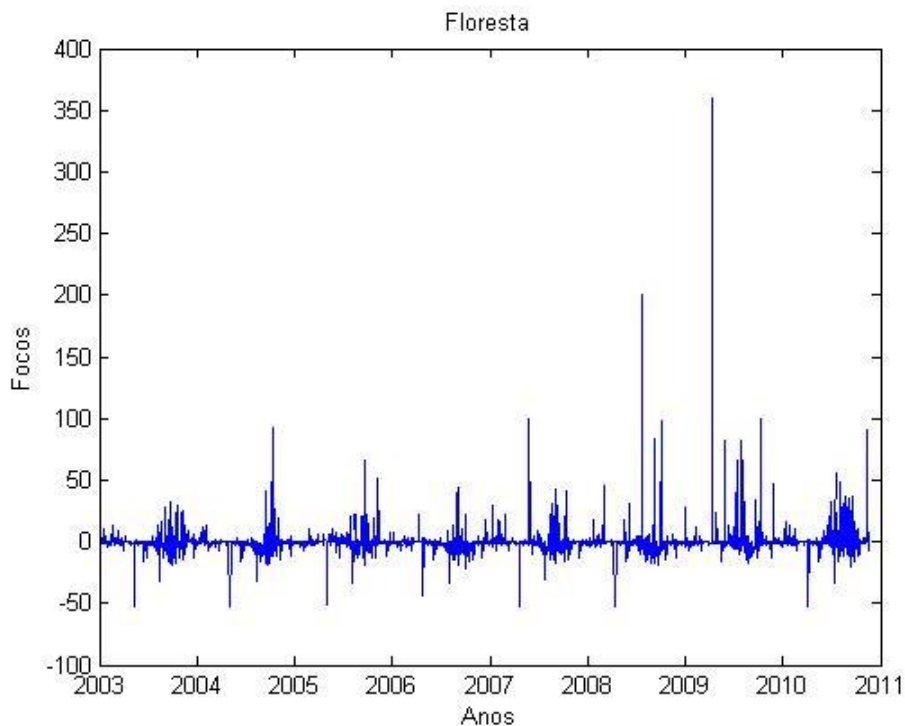


Figura 5.16 – Anomalias diárias de queimadas sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010

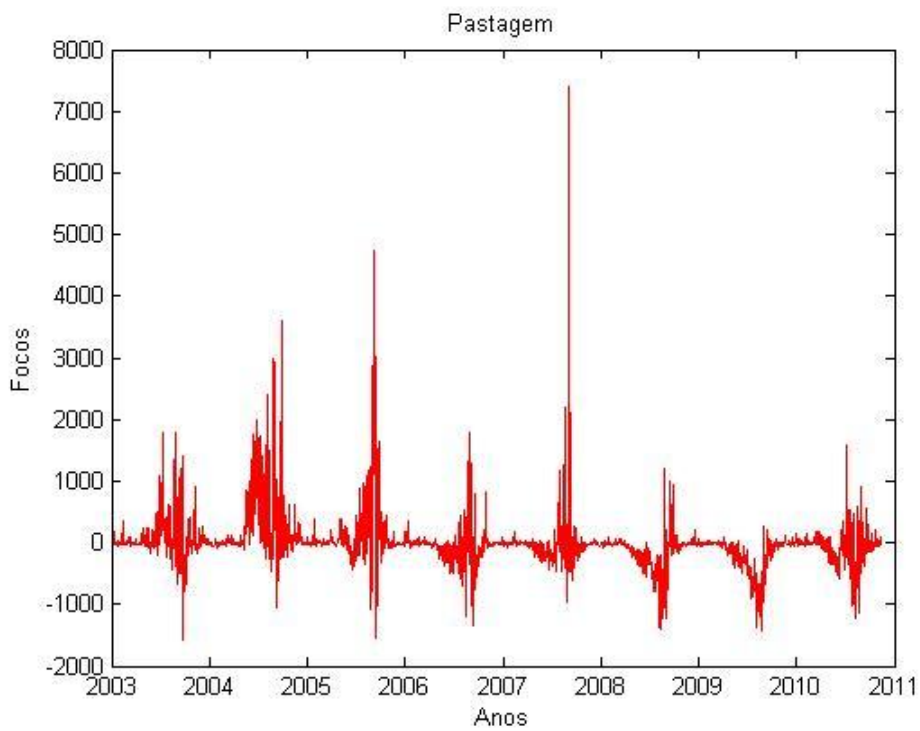


Figura 5.17 – Anomalias diárias de queimadas sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010.

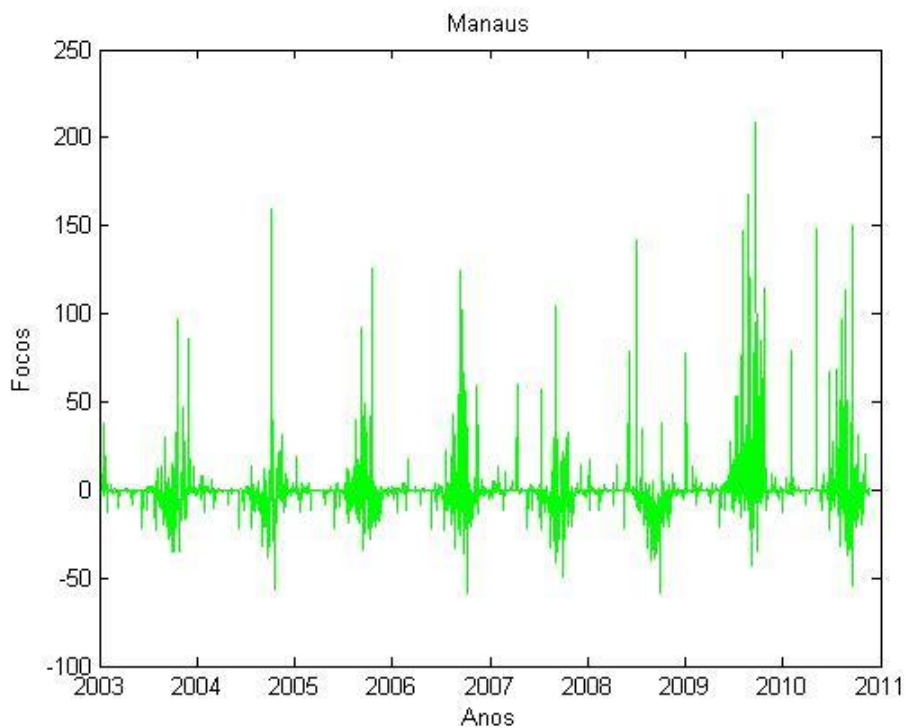


Figura 5.18 – Anomalias diárias de queimadas sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010.

5.2- Séries temporais mensais e anomalias de Precipitação sobre região de floresta, pastagem e Manaus.

De acordo com a Tabela 5.1, o volume anual de precipitação, encontrado pela climatologia dos dados do GPCC para o período compreendido entre 1986 e 2010, é maior na região de floresta, pois apresenta um total de 2569 mm. Depois, a região de Manaus vem como segunda colocada com pouco mais 2200 mm e, em seguida, a região de pastagem com aproximadamente 2000 mm.

Na região de floresta, o volume de chuvas é bem distribuído durante todo o ano. Nos meses que compreendem o inverno austral, há uma redução na precipitação, mas com uma sutil amplitude, cujos máximos atingem 284 mm em maio e os mínimos alcançam 144 mm em agosto. Quando observados os acumulados anuais (Tabela 5.2), verifica-se, na região de floresta, que o ano de 2008 foi o que mais choveu, sendo seguido pelo de ano de 2009, uma vez que ambos registraram mais de 3000 mm de precipitação. Os menores índices acumulados foram observados nos anos de 2003 e 2004, cujos volumes acumulados ficaram em torno de 2400 mm. Os demais anos mantiveram-se dentro de um acumulado próximo a 2800 mm. Na região de Manaus o mínimo de precipitação mensal (Tabela 5.1) atinge 64 mm no mês de agosto. Durante a estação chuvosa, meses compreendidos entre dezembro e maio, o máximo é de 302 mm, no mês de abril. Observa-se, a partir de maio, uma redução dos valores para retomar o crescimento em outubro, no início da estação chuvosa.

Analisando a Tabela 5.2, observando o volume acumulado anual na região de Manaus, percebe-se que 2008 foi o mais chuvoso, totalizando 2842 mm. Os anos de 2003 e 2010 registraram a menor marca, cujo total não ultrapassou 2000 mm, abaixo da média dos demais anos da série. O resultado observado nessa paisagem é comparável à região de floresta, quando analisados os anos com maiores e menores registros acumulados de chuva.

Na região de pastagem, a precipitação mensal (Tabela 5.1) sofre um acentuada redução nos meses do inverno, durante a estação seca, cujos valores de precipitação ficam próximos a 0 mm, sobretudo no mês de julho. A partir desse mês o número de focos de queimadas aumentam significativamente e conseqüentemente elevam-se as concentrações de

CO e, posteriormente de O₃. Percebe-se que os máximos de precipitação mensal são registrados nos meses de verão (em torno de 300 mm mensais). Essa região apresenta uma maior variabilidade mais expressiva que as regiões de Manaus e de floresta.

Entretanto, os acumulados anuais apresentados na Tabela 5.2, demonstram, também, que o ano de 2008 foi o que registrou o maior volume acumulado, 2317 mm de precipitação, por se tratar de um ano de ocorrência de evento de La Niña significativo. Em escala decrescente de valores foram ranqueados os anos de 2006 (2213 mm), 2005 e 2004, ambos com acumulados da ordem de 2100 mm anuais. Da mesma forma que nas regiões de floresta e Manaus, os anos de 2010 e 2003 acumularam as menores volumes de chuva para a região de pastagem, sendo 1669 mm para o ano de 2010 e 1963 mm para o ano de 2003. Vale ressaltar que o ano de 2007 também apresentou acumulado de precipitação abaixo da média dos demais anos da série (1854 mm). Entretanto, na região de Manaus essa queda nos acumulados anuais de precipitação, no ano de 2007, não foi tão acentuada.

Tabela 5.1: Climatologia mensal de precipitação em mm - 1986 a 2010.

Meses	Floresta	Manaus	Pastagem
Jan	254	263	308
Fev	227	276	319
Mar	255	293	295
Abr	277	302	169
Mai	284	238	54
Jun	215	131	11
Jul	185	89	7
Ago	144	64	22
Set	147	80	72
Out	169	103	173
Nov	192	161	228
Dez	222	211	301
Total	2569	2211	1959

Tabela 5.2: Acumulados Anuais de precipitação – 2003 a 2010

Ano	Floresta	Manaus	Pastagem
2003	2329	1972	1963
2004	2475	2219	2116
2005	2800	2215	2114
2006	2869	2303	2213
2007	2808	2164	1854
2008	3022	2842	2317
2009	3010	2193	2016
2010	2745	1999	1669
Média	2757	2238	2033

A Figura 5.19, apresenta a série de precipitação mensal para a região de floresta. O ano de 2009 apresentou o maior acumulado de chuvas, com registro de 400mm em janeiro. Em geral, os demais anos apresentaram acumulados mensais com pouca variação, com acumulados máximos de precipitação mensal em torno dos 350mm. Entretanto, no início de cada ano os acumulados de precipitação iniciam uma fase de crescimento, em fevereiro decrescem, para em março retomar o crescimento dos volumes acumulados de chuvas. Os anos de 2007 e 2010 foram os mais significativos.

A série temporal mensal de precipitação da região de pastagem (Figura 5.20) apresenta 2008 com o maior registro acumulado mensal de chuvas, cujo máximo ficou em torno de 500mm em janeiro. Os anos de 2007 e 2005, também, apresentaram resultados similares ao ano de 2008, com acumulados mensais próximos a 500mm. Os anos de 2003, 2004, 2006 e 2010, totalizaram acumulados mensais em torno de 400mm no período chuvoso.

Diferentemente das regiões de floresta e Manaus, essa paisagem tem acumulados mensais de precipitação quase próximos a zero (julho e agosto) para a estação seca. Nesse período são observadas as maiores quantidades de focos de queimadas. Esse processo de queima é cíclico e recorrente, de origem predominantemente antropogênica. Evidentemente, que as mudanças de uso da terra são o fator mais importante para o agravamento desse fenômeno, haja vista tratar-se de região utilizada para agricultura e pecuária intensiva. Dessa

forma, pode-se afirmar que as chuvas modulam as queimadas e sua dinâmica, como sugere Kirchhoff (1988; 1990; 1996) e Aires & Kirchhoff (2001).

A Figura 5.21 apresenta a série temporal mensal de chuvas para a região de Manaus. Os mais significativos acumulados de chuva foram observados para os anos de 2004, 2006, 2008 e 2009, cujos acumulados apresentaram-se por volta de 400mm. O ano de 2003 registrou o menor volume acumulado (aproximadamente 300mm). Todavia, os acumulados máximos observados para os anos de 2006 e 2010 são similares aos de 2003. Com exceção do ano de 2008, todos os demais anos da série apresentam crescimento logo nos primeiros meses do ano, em seguida sofrem um declínio para, novamente, retornar a crescer progressivamente os acumulados de precipitação. Nessa paisagem, esse comportamento é mais acentuado que a região de floresta. Da mesma forma, os anos de maiores acumulados de precipitação foram 2007 e 2010.

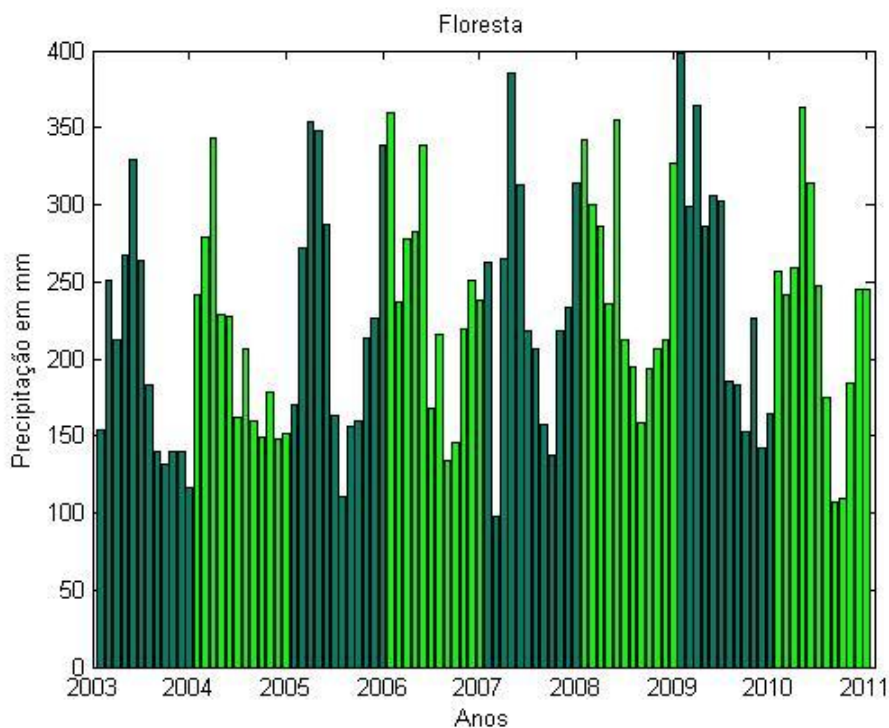


Figura 5.19 – Série temporal mensal de precipitação sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010.

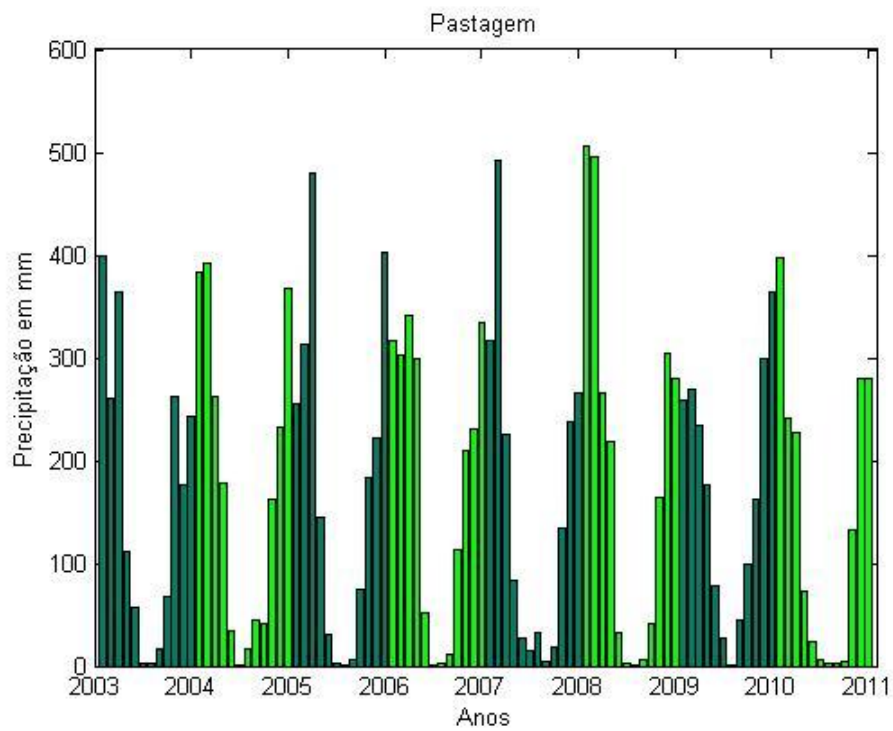


Figura 5.20 – Série temporal mensal de precipitação sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010.

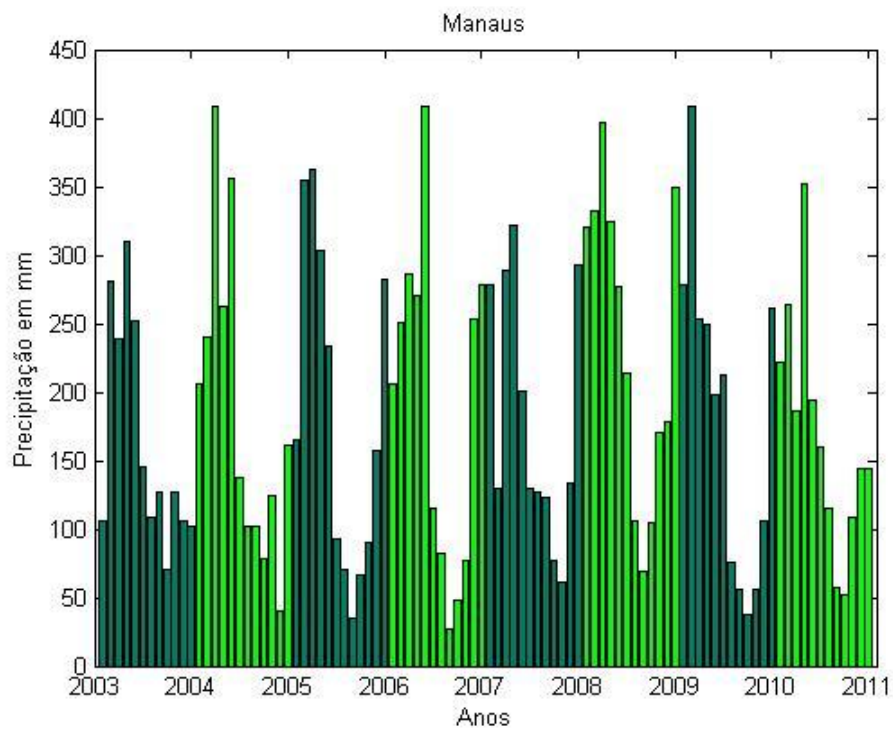


Figura 5.21 – Série temporal mensal de precipitação sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010.

As séries de anomalias mensais de precipitação são apresentadas nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 para floresta, pastagem e Manaus, respectivamente. No que concerne às anomalias da região de floresta (Figura 5.22), percebe-se que as positivas foram mais perceptíveis para o ano de 2008, cujo máximo ficou próximo a 150mm/mês. Os anos de 2004, 2005, 2006 e 2007 registram anomalias positivas com valores em torno de 100 mm/mês. Todos os anos da série apresentaram anomalias positivas, entretanto, os anos de 2004, 2005 e 2010 registraram anomalias positivas e negativas se alternando. O ano de 2009 apresentou anomalias positivas, mas com valores inferiores aos de 2008. As anomalias negativas mais pronunciadas foram notadas para os anos de 2007 com quase 150mm/mês em fevereiro e 2003, um pouco superior a 100mm/mês para o mês de dezembro. Porém, os anos 2004, 2005 e 2010 também apresentaram anomalias negativas. De modo geral, as anomalias para essa paisagem foram basicamente positivas e mais pronunciadas no ano de 2009, quando ocorreu um forte evento de La Niña, resultando em aumento nos acumulados de precipitação (Marengo 1992).

A Figura 5.23 apresenta as anomalias para a região de pastagem, onde se percebem claramente anomalias positivas para dois meses do ano de 2008, próximo à de 200mm/mês e para 2005 e 2007, um pouco superiores a marca de 150mm/mês. Mesmo inferior a 100mm/mês, o ano de 2009 merece ser mencionado, pois nesse ano ocorreu um evento de La Niña. As anomalias negativas foram mais pronunciadas para os anos de 2007 e 2010, que foram anos de El Niño. Contudo, os anos de 2003, 2004, 2005 e 2009 também apresentaram registros de acumulados de chuva abaixo da média, ao menos em parte do período, mas as anomalias não ultrapassaram 50mm/mês.

As anomalias mensais de precipitação para a região de Manaus (Figura 5.24) registram acumulados positivos para todos os anos da série, entretanto, os anos de 2004, 2006, 2008 e 2009 foram os mais expressivos, cujos valores apresentaram-se acima de 100mm/mês. Com exceção de 2008, todos os demais anos apresentaram anomalias negativas, cuja maior significância foi observada para os anos de 2003, 2004, 2007 e 2010, visto que atingiram volumes de precipitação com acumulados em torno a 150mm abaixo da média climatológica do período. O maior período ininterrupto de anomalias positivas é observado para os anos de 2008 e 2009. A região de floresta apresentou um comportamento similar ao comportamento

encontrado na região de Manaus e manteve-se com anomalias, tanto negativas como positivas, dentro de um padrão médio uniforme entre as três áreas do estudo.

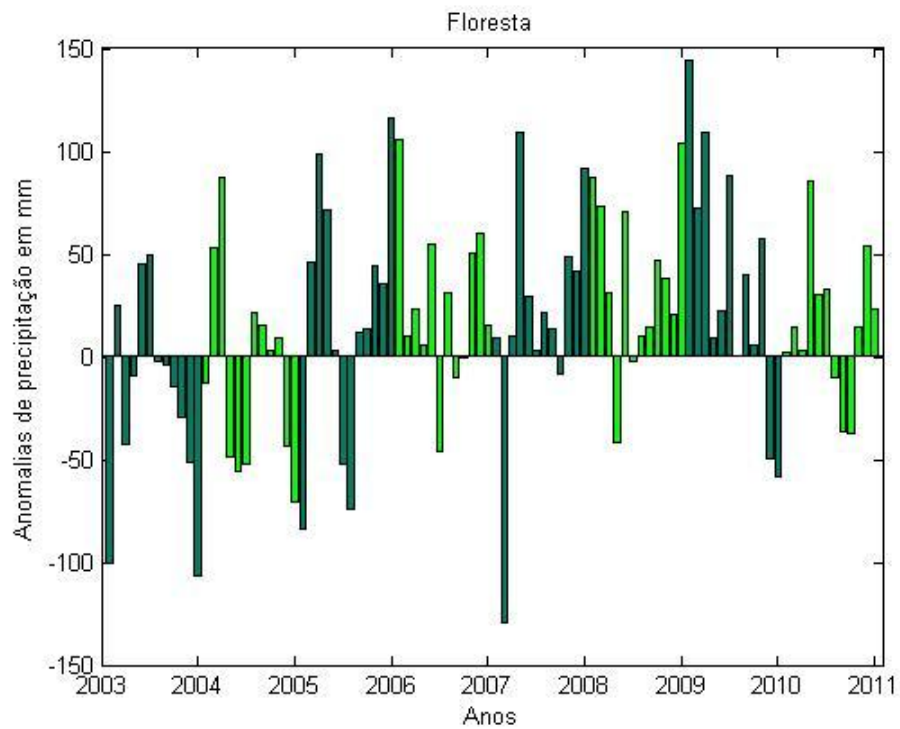


Figura 5.22 – Anomalias mensais de precipitação sobre região de floresta para o período de 2003 a 2010.

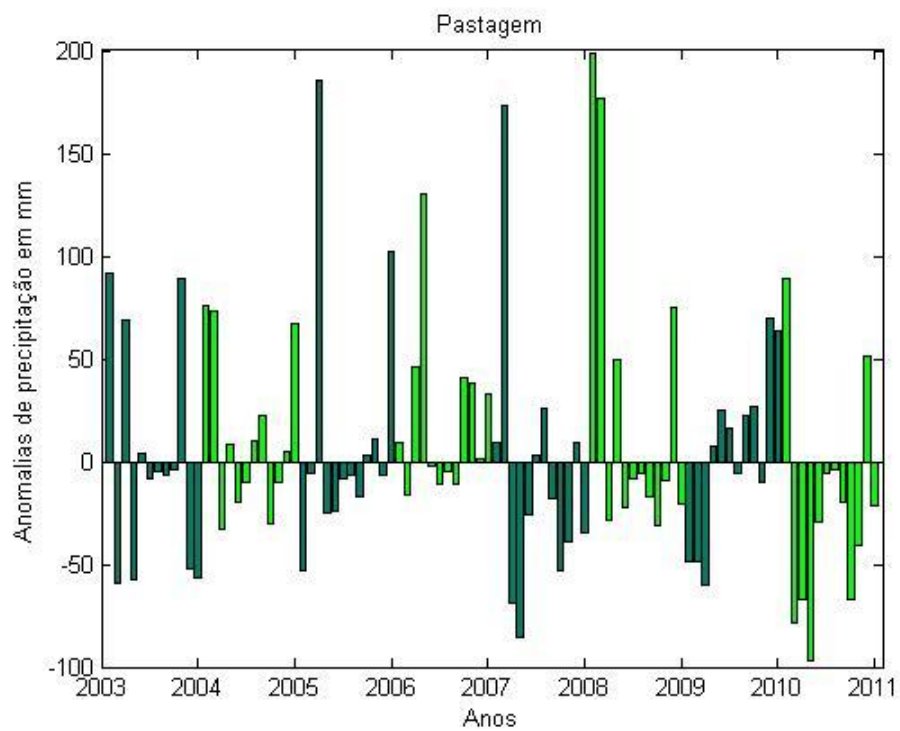


Figura 5.23 – Anomalias mensais de precipitação sobre região de pastagem para o período de 2003 a 2010.

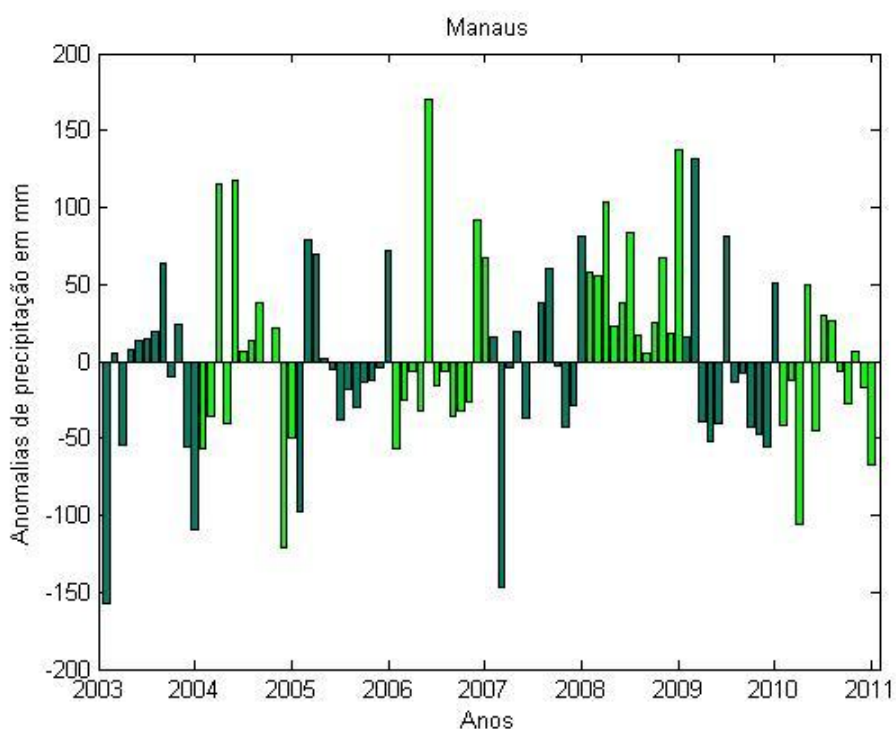


Figura 5.24 – Anomalias mensais de precipitação sobre região de Manaus para o período de 2003 a 2010.

5.3 - Ciclo sazonal de O₃, CO, Focos de Queimadas e Precipitação

As Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam os diagramas de caixa (“*box plot*”) da distribuição sazonal de O₃ para cada paisagem, em três níveis de pressão. De modo geral, pode-se perceber para a região de floresta (Figura 5.25) que as maiores concentrações desse gás são observadas na estação seca, com concentrações máximas no mês de outubro. Após o período da estiagem essas concentrações começam a reduzir atingindo os menores valores no auge da estação chuvosa, sendo maio o mês com as menores concentrações de O₃. Por outro lado, nota-se que no mês de fevereiro há uma pequena elevação nas concentrações, mas que em seguida já retoma o decréscimo até o início da próxima estação, sendo mais acentuada em níveis mais próximos à superfície. Esse fenômeno é sentido também, na climatologia de precipitação, no sentido inverso. Os acumulados de chuva vem crescendo a partir de outubro, mas reduzem, no início do ano para, em seguida, crescer novamente.

A média das concentrações de O₃ na região de floresta para a estação chuvosa foi de $1,49 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm² e para a estação seca de $1,84 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm². Percebe-se que a

média das concentrações encontrada para a estação seca representa 25% a mais que a média do período chuvoso. Os meses de setembro e outubro apresentaram concentrações acima da média para a estação seca. Se avaliada a estação chuvosa, observa-se que o mês de fevereiro apresenta-se com concentrações acima da média, mas somente nos níveis de 750mb e 850mb, provavelmente devido a contribuição de algum precursor local ou por transporte de O₃ de altos níveis para baixos níveis por convecção.

As concentrações de O₃ para a região de pastagem (Figura 5.26) são mais acentuadas que nas demais regiões, cujos valores máximos são mais expressivos no nível de 500mb. Contudo, nesse nível, as maiores concentrações são observadas no mês de outubro, sugerindo possivelmente transporte de precursores de outras regiões, uma vez que nos níveis de 750mb e 850 mb, o mês de setembro desponta como o de maior concentração desse gás, combinando com a dinâmica das queimadas, cujos focos são, também, mais elevados nesse mesmo mês. A média das concentrações desse gás para a estação chuvosa foi de $1,5 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm² e para a seca de $1,78 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm². O maior número sofre um acréscimo de 20% em relação ao menor. Os mínimos do ciclo tem comportamento muito similar à média, entretanto, quando avaliados os máximos, percebe-se que o mês de outubro, no nível de 500 mb, mantém-se bem acima da média.

A distribuição sazonal de O₃ para a região de Manaus (Figura 5.27), tem semelhanças com a região de floresta. Todavia, o mês de fevereiro, nos níveis de 750 mb e 850 mb, apresenta um pequeno acréscimo das concentrações de O₃ da mesma forma que na região de floresta, mas em escala menor. É possível que o precursor responsável por essa elevação seja o CO estimado no mês de dezembro, o que causaria retardo na produção de O₃. Entretanto, algum contribuinte local pode ser o responsável por esse leve aumento. Esse contribuinte bem poderia ser um precursor biogênico, como por exemplo, o isopreno (C₅H₈), pois o entorno dessas regiões é de floresta tropical densa, com elevada taxa de umidade e alta disponibilidade de radiação solar e esse hidrocarboneto tem potencial de emissão 7 vezes superior aos demais compostos orgânicos voláteis antropogênicos como sugerido por Guenther *et al.* (1995; 1999). Igualmente, o transporte entre camadas da atmosfera ocorre por convecção, sobretudo, no período chuvoso. Esse comportamento foi observado em estudos realizados por Betts *et al.* (2002), Sigler *et al.* (2002), Grant *et al.* (2008) e Hu *et al.* (2010)

A média das concentrações no período chuvoso para a região de Manaus foi de $1,49.10^{16}$ moléculas/cm² e para o período seco de $1,86.10^{16}$ moléculas/cm². O resultado foi equivalente à região de Floresta, pois a média da estação seca apresentou um aumento de 25% nas concentrações em relação à média da estação chuvosa. Novamente, os máximos do mês de fevereiro, para os níveis de 750 mb e 850 mb, foram muito superiores à média da estação.

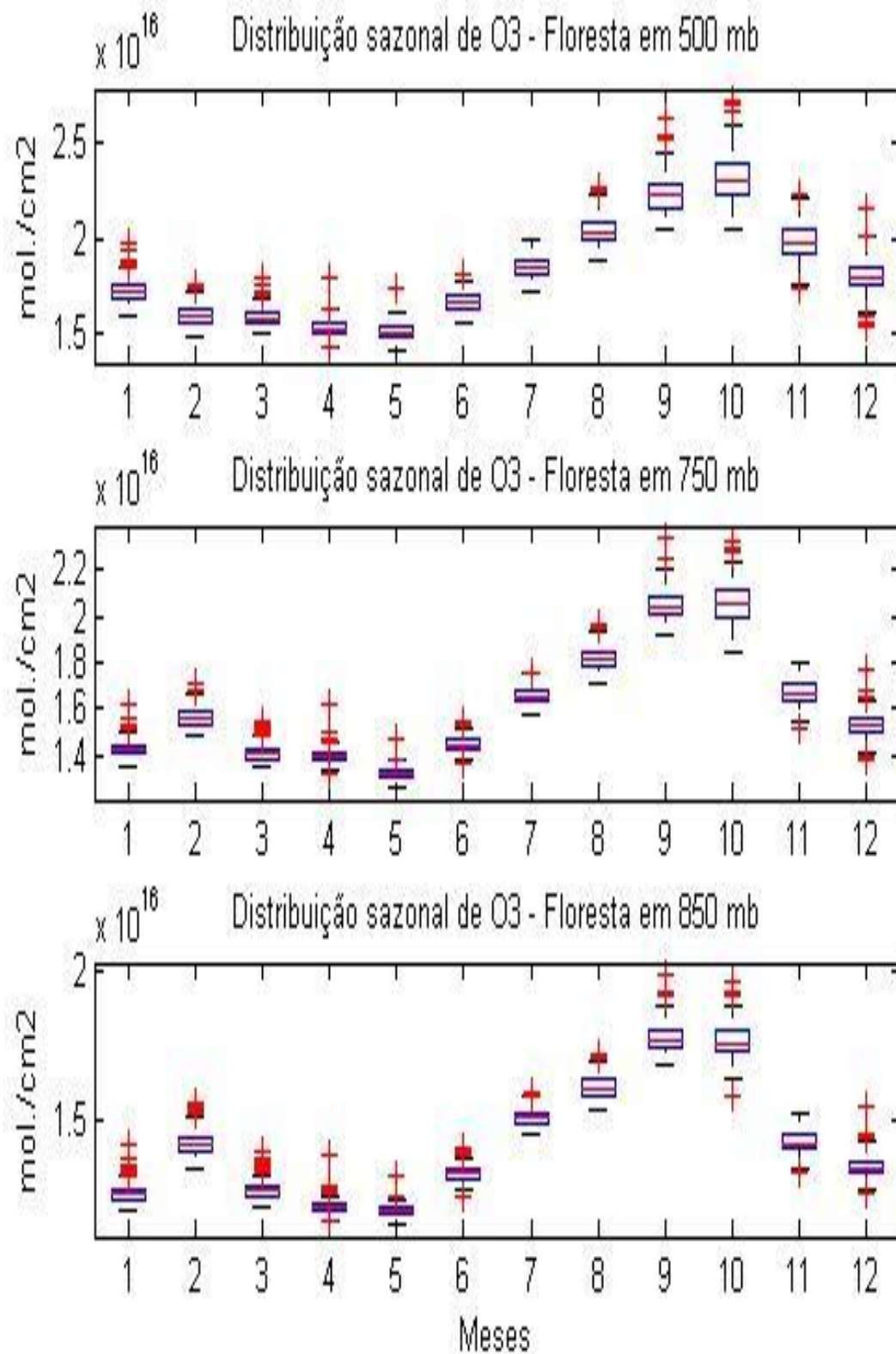


Figura 5.25 – Distribuição sazonal de O₃ em região de floresta para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.

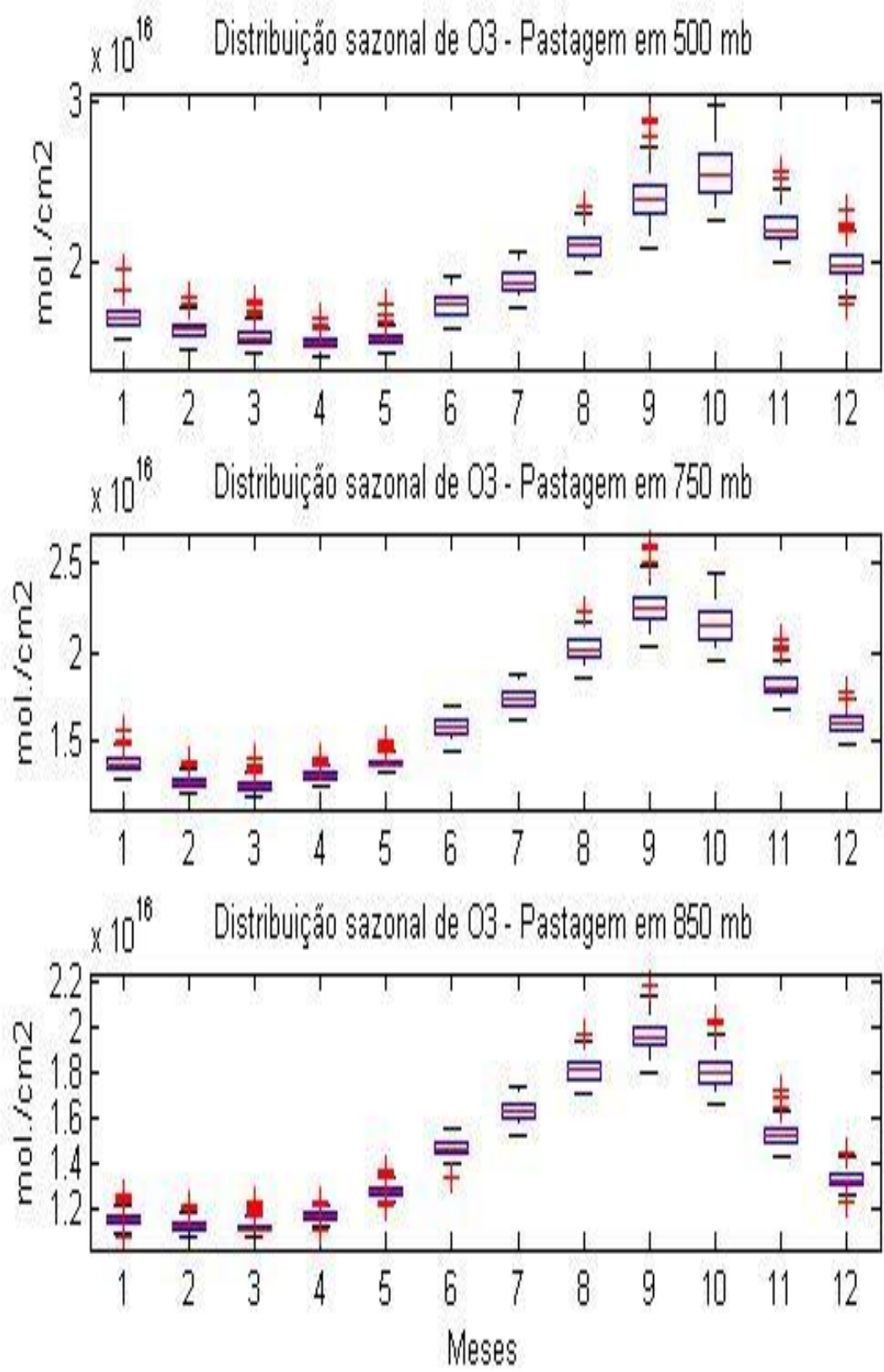


Figura 5.26 – Distribuição sazonal de O₃ em região de pastagem para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.

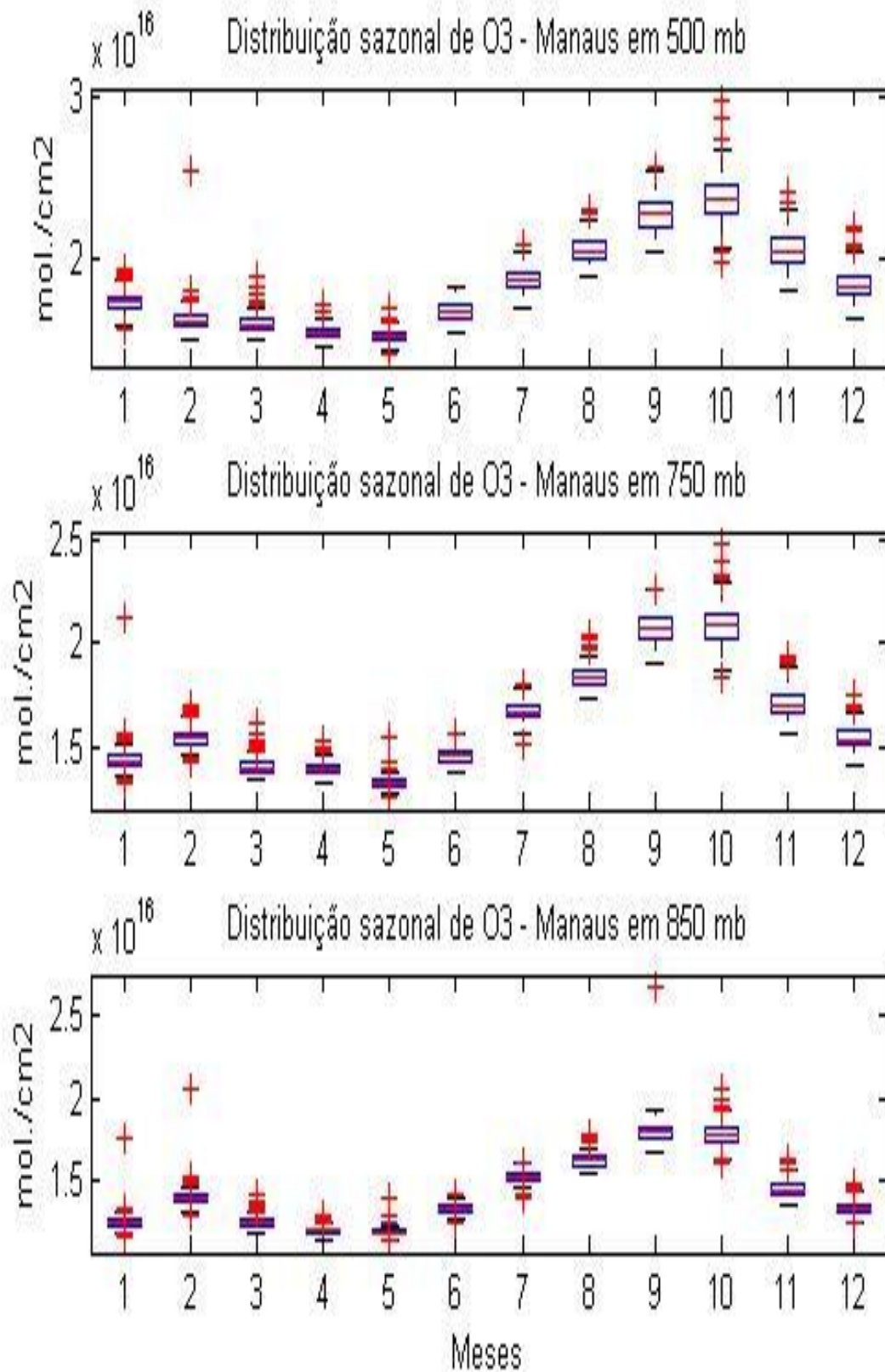


Figura 5.27 – Distribuição sazonal de O₃ na região de Manaus para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão

As Figuras 5.28, 5.29 e 5.30 apresentam os diagramas de caixa da distribuição sazonal de CO para cada paisagem em três níveis diferentes de pressão. A Figura 5.28 apresenta a distribuição de CO para a região de floresta. Percebe-se, em todos os níveis, que o mês de outubro apresenta as maiores concentrações desse gás, caracterizado, possivelmente, pela dinâmica das queimadas. Porém, o mês de setembro, também, é representativo, cujos valores, para ambos os meses, são expressivos, sobretudo, no nível de 850 mb. Sendo assim, o ciclo sazonal de CO é similar ao ciclo de O₃, sugerindo que o aumento das concentrações do primeiro elevam as concentrações do segundo, em concordância com outros trabalhos elaborados por Kirchhoff (1988; 1996). As concentrações médias observadas na região de floresta para a estação chuvosa manteve-se na ordem de $5,6 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm² e para a estação seca de $6,12 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm². A maior concentração média recebe um incremento de 10% em relação à média do período chuvoso. Os meses de setembro e outubro se apresentam com concentrações superiores à média da estação, em todos os níveis.

Na Figura 5.29, que avalia a distribuição de CO sobre a região de pastagem, observa-se a mesma sazonalidade perceptível na distribuição de O₃. Durante a estação seca, as concentrações de CO aumentam sensivelmente devido a queima de biomassa na região do arco do desmatamento. Entretanto, as maiores concentrações desse gás na região de pastagem ocorre nos meses de setembro com ciclo sazonal bem definido. As estimativas de CO crescem na estação seca ocasionadas pelas queimadas regionais, cujo mecanismo favorece as mudanças de uso da terra, e decrescem na estação chuvosa. Dessa forma é possível que o aumento das concentrações de CO, catalisadas pelo período de queimadas na região do arco do desmatamento incrementam as concentrações de O₃ tornando esse processo cíclico modulado pela climatologia da precipitação.

A Figura 5.30 apresenta os diagramas de caixa (“*box plot*”) para a região de Manaus. Percebe-se comportamento semelhante à região de floresta. Contudo, as concentrações de CO são superiores, provavelmente, devido ao fato do desenvolvimento das atividades antropogênicas que fazem uso da queima de combustíveis fósseis. Ainda assim, nos três níveis de pressão, as maiores concentrações são percebidas para o mês de outubro. A média das concentrações de CO na região de Manaus para o período chuvoso foi de $5,44 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm² e $5,64 \cdot 10^{16}$ moléculas/cm² para o período seco.

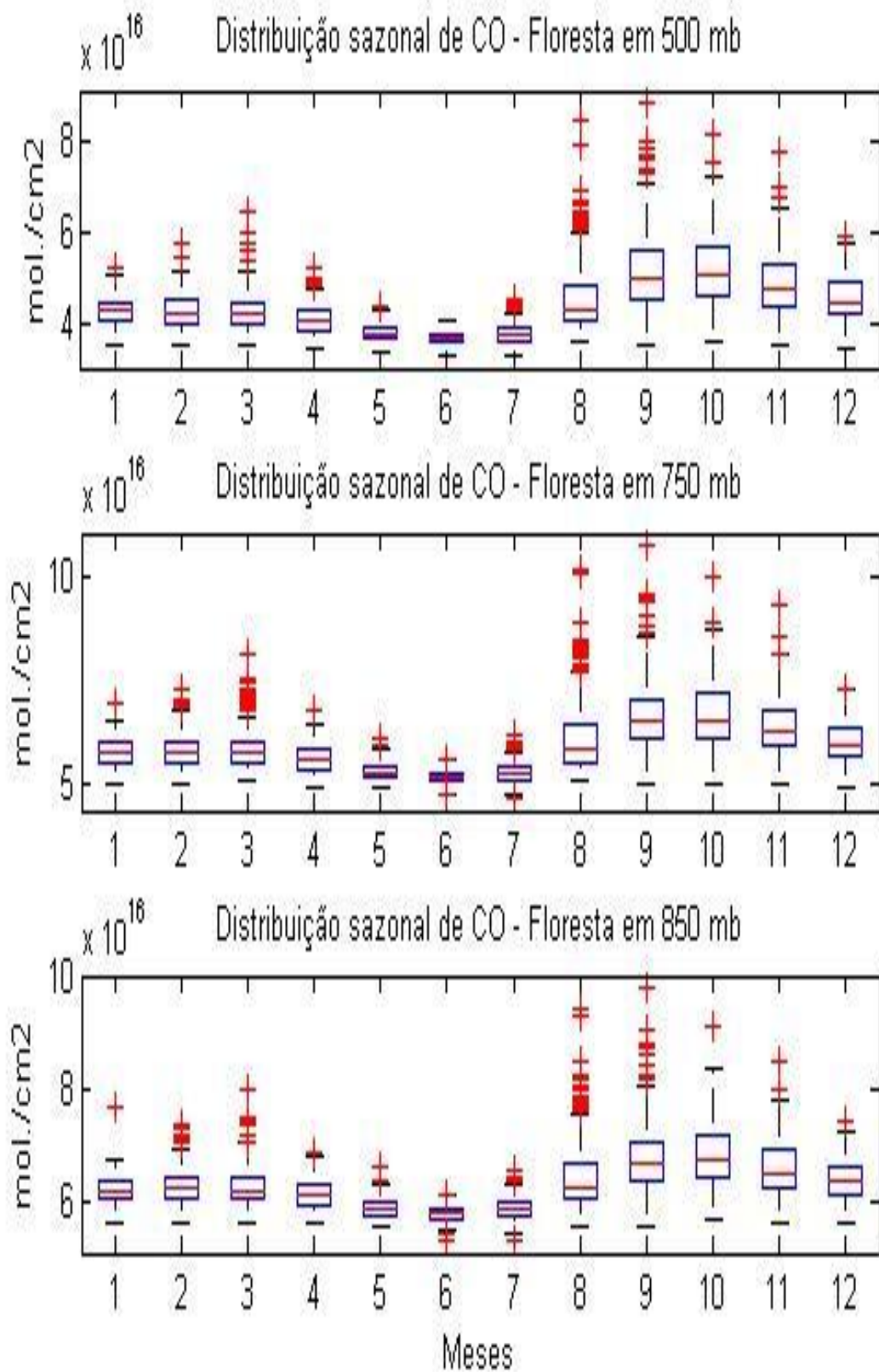


Figura 5.28 – Distribuição sazonal de CO em região de floresta para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.

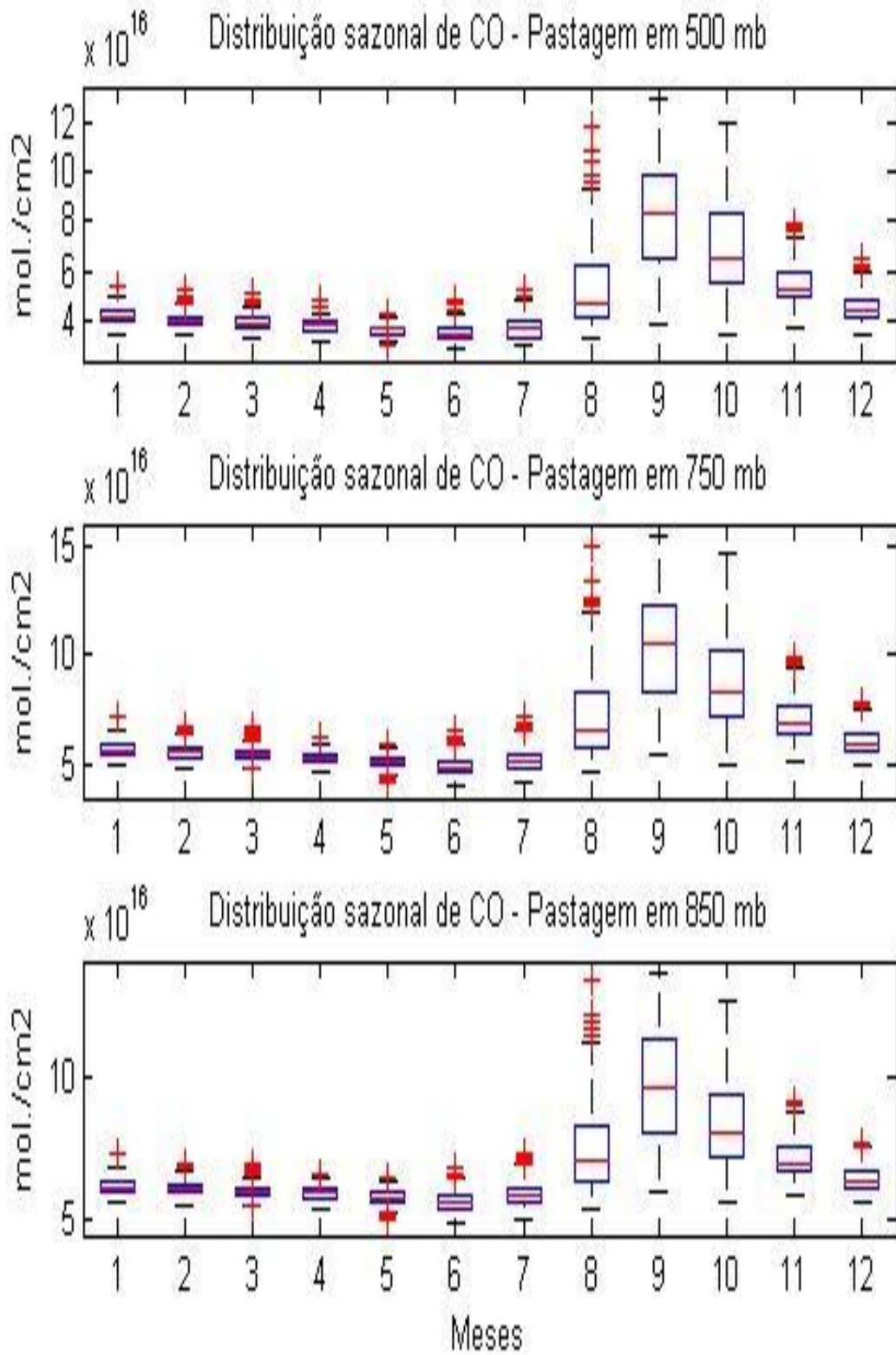


Figura 5.29 – Distribuição sazonal de CO em região de pastagem para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.

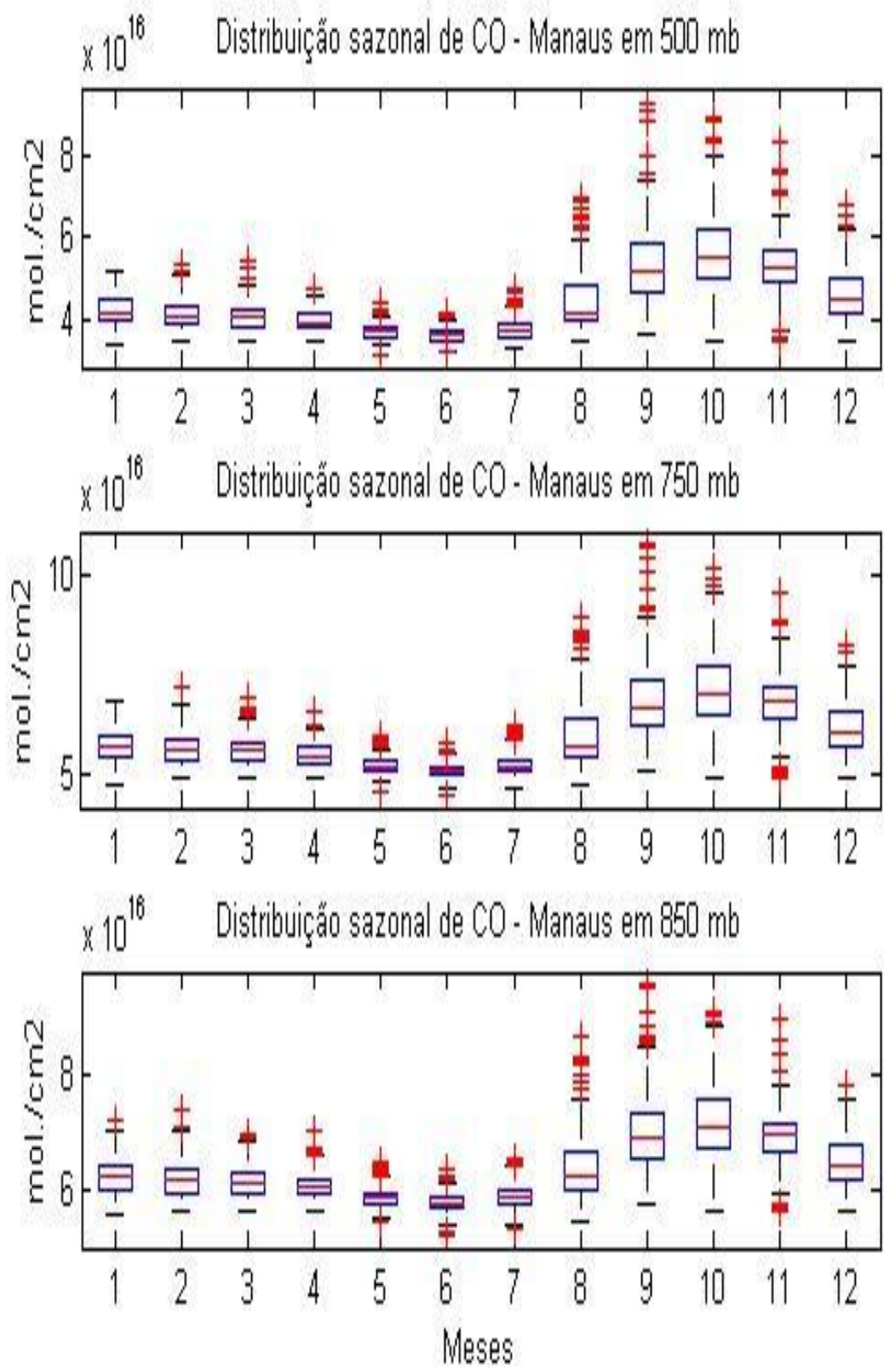


Figura 5.30 – Distribuição sazonal de CO na região de Manaus para o período de 2003 a 2010 – em três níveis de pressão.

As Figuras 5.31 e 5.32 apresentam os diagramas de caixa (“*box plot*”) referente a distribuição sazonal de queimadas e precipitação para as três paisagens analisadas, respectivamente. Percebe-se, na região de floresta e Manaus (Figura 5.31), que os padrões de queimadas são parcialmente similares, embora essa última paisagem apresente concentrações maiores que a outra. O total de focos, nos meses de maior expressão de queima de biomassa, é verificado para os meses da estação seca, em ambas as paisagens, mas com maior acento para o mês de outubro.

A região de pastagem, apresenta volumes de focos de queimadas diferente das outras regiões, pois seus registros são mais elevados. Durante a estação seca, inicia-se a prática da queima de biomassa, como técnica e mecanismo de preparação da terra para agricultura e/ou pecuária. Essa região está submetida a forte alteração do uso da terra no desenvolvimento de atividades agropastoris, o que eleva os pontos de queimadas nessa estação conforme observado por Kirchhoff (1988; 1990; 1996), Aires & Kirchhoff (2001) e Rummel *et al.* (2007). A maior frequência de focos é observado para o mês de setembro, cujo extremo observado para série situa-se nesse mês. Confirmando a tendência, nas três paisagens, ainda que a região de pastagem apresente máximo dos focos de queimadas adiantado em um mês em relação às regiões de floresta e Manaus, a distribuição sazonal é modulada pela climatologia de precipitação. Os volumes de chuva, são distribuídos diferentemente nas três paisagens, mas apresentam comportamentos sazonais similares (Figura 5.32).

Na região de Manaus, o comportamento é similar à região de floresta, entretanto, a distância entre os mínimos de uma paisagem e de outra, é significativa. Durante a estação seca, nos meses de agosto e setembro, os menores volumes acumulados chegam a representar quase a metade dos acumulados mínimos de floresta. Quando observada a região de pastagem, confirma-se uma sazonalidade bem definida, com a presença de uma estação chuvosa e outra seca. Na estação seca, os acumulados mensais de precipitação são reduzidos e observados nos meses de junho e julho. Observa-se que as três paisagens possuem um ciclo sazonal bem definido com defasagem de poucos meses.

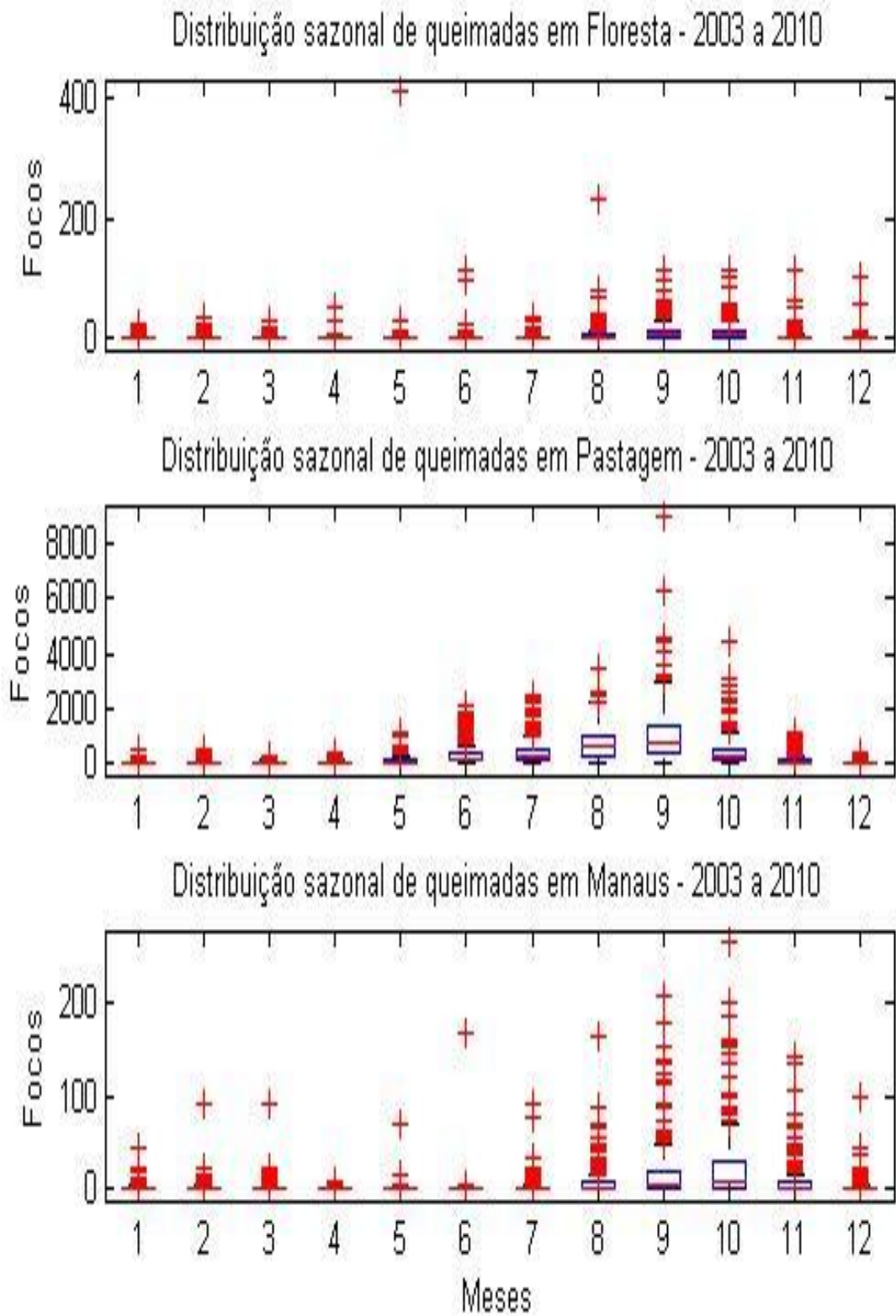


Figura 5.31 – Distribuição sazonal de queimadas nas regiões de floresta, pastagem e Manaus para o período de 2003 a 2010.

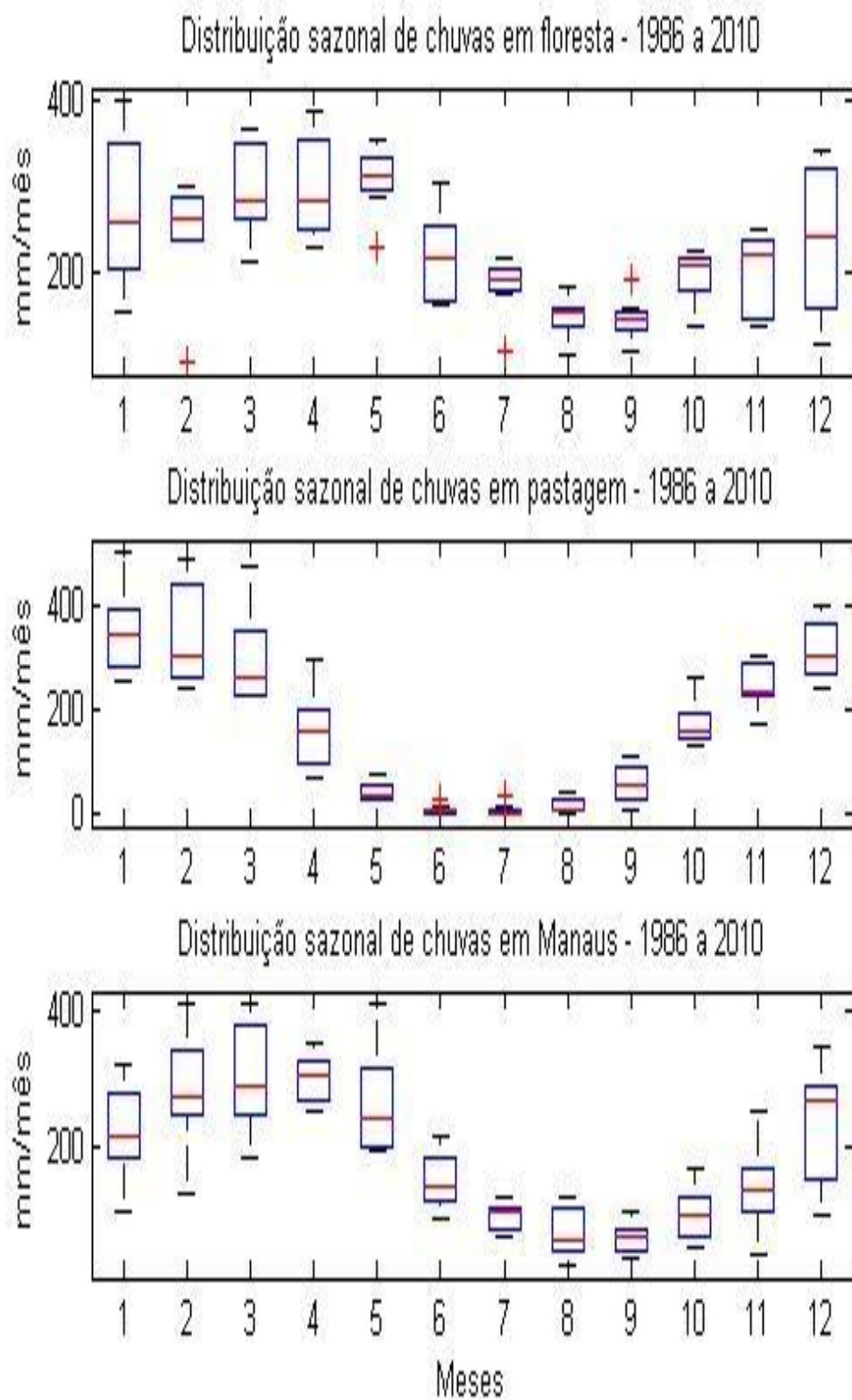


Figura 5.32 – Distribuição sazonal de chuvas nas regiões de floresta, pastagem e Manaus para o período de 1986 a 2010.

5.4– Análise de coerência e fase entre CO, Queimadas e O₃

Até aqui foram analisados as concentrações de CO e O₃, em três níveis de pressão, os focos de queimadas, os acumulados de precipitação e os padrões sazonais de distribuição. Daqui em diante far-se-á análise dos padrões de variabilidade associando os gases (CO com O₃), Queimadas com CO e Queimadas com O₃. Para isso, a análise de coerência e fase foi realizada com o propósito de identificar as escalas de tempo em que as variáveis apresentam maior relação entre si. Dessa forma, análises de coerência e fase entre as concentrações de CO e O₃, entre os focos de queimadas e CO e também, entre focos de queimadas e O₃ foram realizadas para cada nível de pressão da série de gases.

Vale ressaltar que, baixos valores de coerência entre as séries é um indicativo de que as variabilidades entre elas são independentes. Por outro lado, elevados valores de coerência, perceptíveis em certas frequências e períodos, indicam que as séries apresentam variações na mesma frequência. Nesses períodos e escalas, as séries entre gases (CO e O₃) e entre focos de queimadas e gases (CO e O₃) podem relacionar-se, com maior ou menor intensidade.

A análise da fase ou defasagem entre as séries fornecem uma melhor caracterização da relação entre elas, e é ilustrada nas figuras por uso de setas. Quando as setas apontam para a direita as séries estão em fase; para a esquerda as séries estão fora de fase de até 180 graus; para baixo, a série de CO ou de queimadas está antecedendo a da série de gases (CO e O₃) em até 90 graus; e para cima precedendo.

Seguindo essa terminologia e as análises para os três níveis de pressão, sobre a região de floresta, as Figuras 5.33, 5.34 e 5.35 exibem as relações entre a série temporal de CO com a série temporal de O₃. Para o nível de 500 mb (Figura 5.33) foi notada uma relação significativa entre o CO e O₃ em diferentes escalas de tempo. Na escala diária (até 90 dias) coerência significativa, nos anos de 2004, 2005 e 2007 indicam forte relação entre as séries de CO e O₃, com uma defasagem em torno de 6 a 10 dias. Para a escala sazonal, valores significativos de coerência foram encontrados para o ano de 2005. Consistente com resultados anteriores, a relação entre Co e O₃ na escala sazonal está praticamente em fase. Paea escalas de maiores que um ano, coerência significativa foi observada nos anos de 2005, 2006 e 2008.

A Figura 5.34 apresenta os resultados da análises de coerência e fase para o nível de 750 mb. Nesse nível, coerências significativas são distribuídas durante todo o período de estudo, nas diversas escalas de tempo analisadas similar ao que ocorre para o nível de 500 mb. O mesmo comportamento é notado para o nível de 850 mb (Figura 5.35), exceto para a escala temporal entre 6 meses e 1 ano onde há uma forte relação de dependência das séries para os anos de 2005, 2006 e 2007.

Os resultados apresentados nessas análises de coerência e fase sugerem uma relação entre os índices de CO e O₃. Ainda, uma característica notável nessas análises é que essa relação ocorre para diferentes escalas temporais em todos os níveis de pressão analisados. Particularmente, entre os anos de 2005 a 2007, é notada forte relação entre as séries temporais de CO e O₃ na escala de tempo anual.

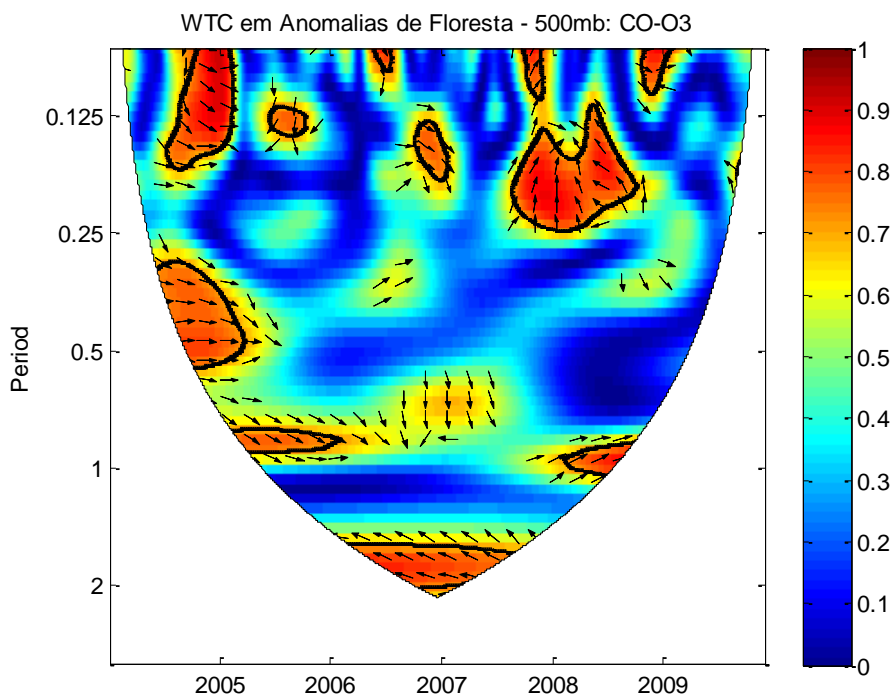


Figura 5.33 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O₃, nos nível de 500 mb para a região de floresta. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de anomalias de CO e O₃ estão em fase; para a esquerda, as séries de anomalias estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série anomalia de CO está adiantada da série de O₃ por até 90 graus e; para cima, o inverso.

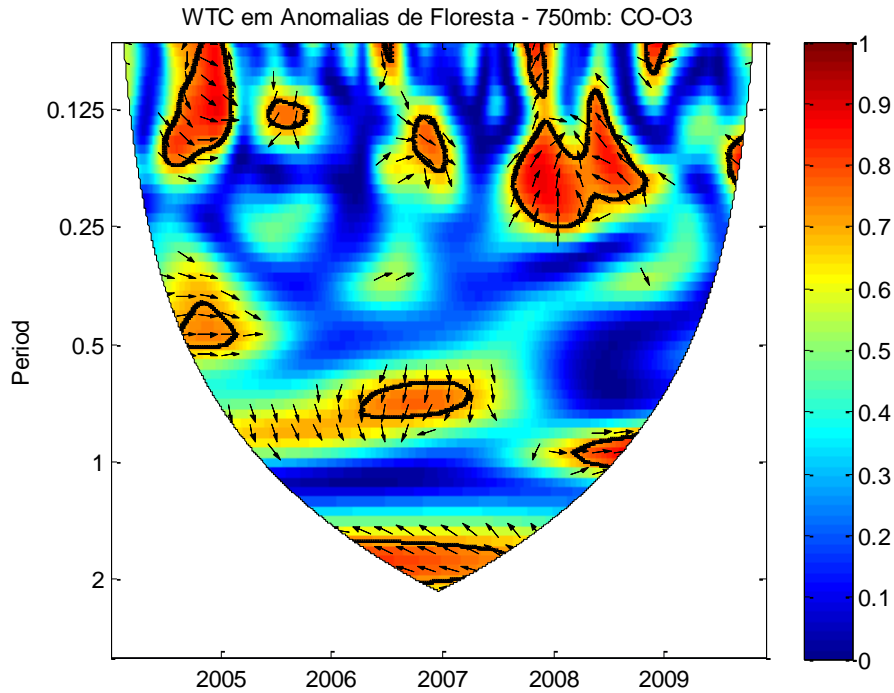


Figura 5.34 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O₃, nos nível de 750 mb para a região de floresta. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de anomalias de CO e O₃ estão em fase; para a esquerda, as séries de anomalias estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série anomalia de CO está adiantada da série de O₃ por até 90 graus e; para cima, o inverso.

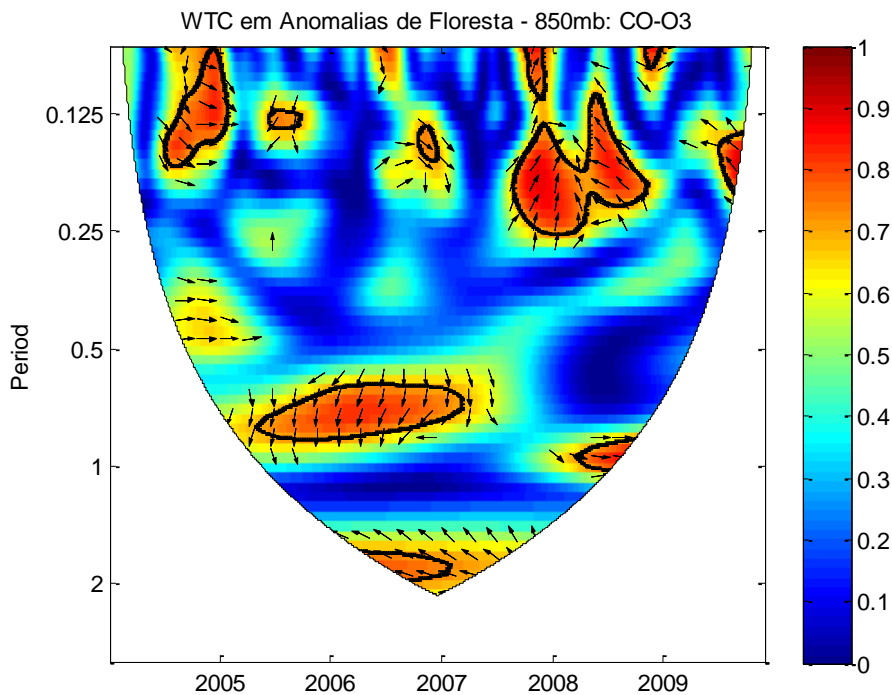


Figura 5.35 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O₃, nos nível de 850 mb para a região de floresta. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de anomalias de CO e O₃ estão em fase; para a esquerda, as séries de anomalias estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série anomalia de CO está adiantada da série de O₃ por até 90 graus e; para cima, o inverso.

As Figuras 5.36, 5.37 e 5.38 apresentam as análises de coerência e fase entre as séries de anomalias de CO e O₃ para a região de Manaus. Para o nível de 500 mb (Figura 5.36) observa-se coerência significativa distribuídas ao longo da série. Na escala de tempo de 1,5 anos e 2 anos a série de CO apresenta uma defasagem de 6 meses em relação à série de O₃. Entretanto, para todos os anos, e para a escala de tempo que varia de 6 meses a 1 ano há uma indicação da relação entre Co e O₃, porém não significativa. Para os níveis de 750 e 850 mb, Figuras 5.37 e 5.38, respectivamente, o padrão de coerência e fase é similar ao encontrado para o nível de 500 mb.

De modo geral , para os anos de 2006 a 2008, num intervalo de tempo de 1,5 a 2 anos foi encontrada uma forte relação de dependência entre as séries, nos três níveis de pressão (Figuras 5.36, 5.37 e 5.38). Da mesma forma, para um período de tempo próximo a 6 meses, os anos de 2004 e 2009 apresentam elevada coerência, demonstrando que as séries estão em fase. Uma relação menos significativa é encontrada para os anos de 2007 a 2008, numa escala temporal que vai de 3 meses a 1 ano.

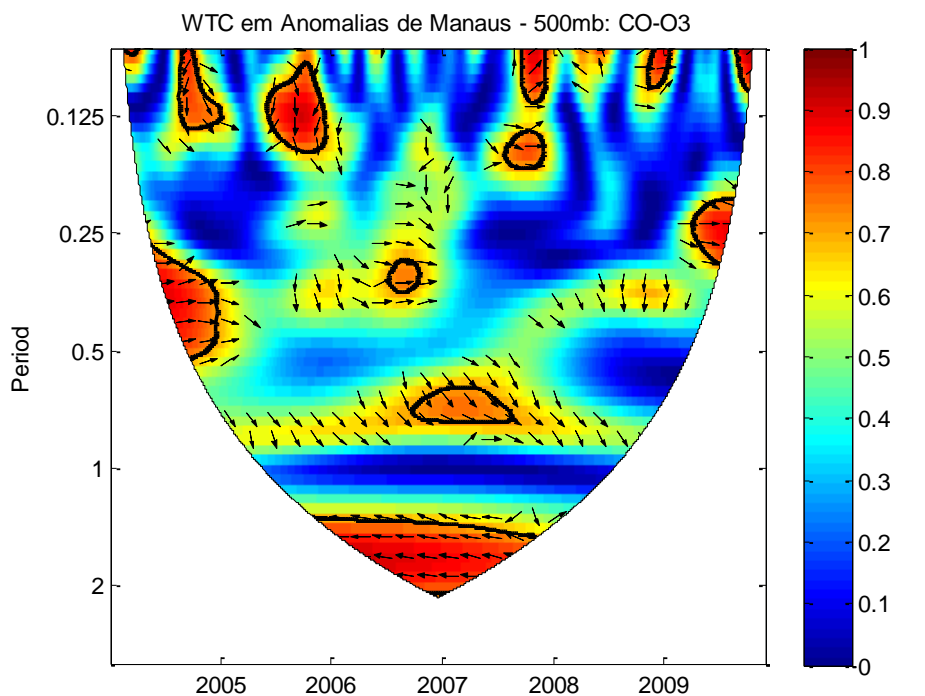


Figura 5.36 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O₃, no nível de 500 mb para a região de Manaus. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de anomalias de CO e O₃ estão em fase; para a esquerda, as séries de anomalias estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série anomalia de CO está adiantada da série de O₃ por até 90 graus e; para cima, o inverso.

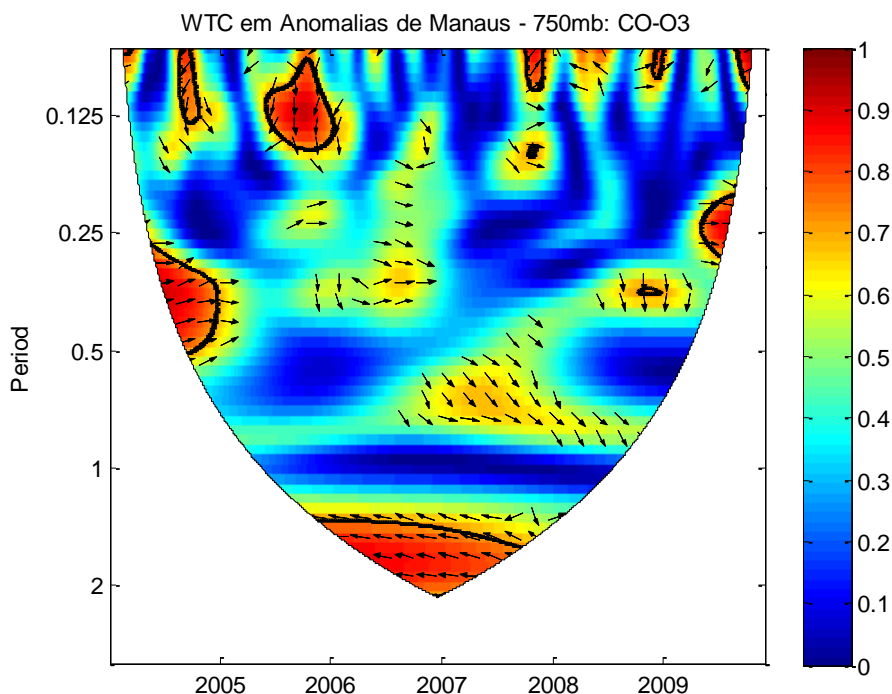


Figura 5.37 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O₃, no nível de 750 mb para a região de Manaus. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de anomalias de CO e O₃ estão em fase; para a esquerda, as séries de anomalias estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série anomalia de CO está adiantada da série de O₃ por até 90 graus e; para cima, o inverso.

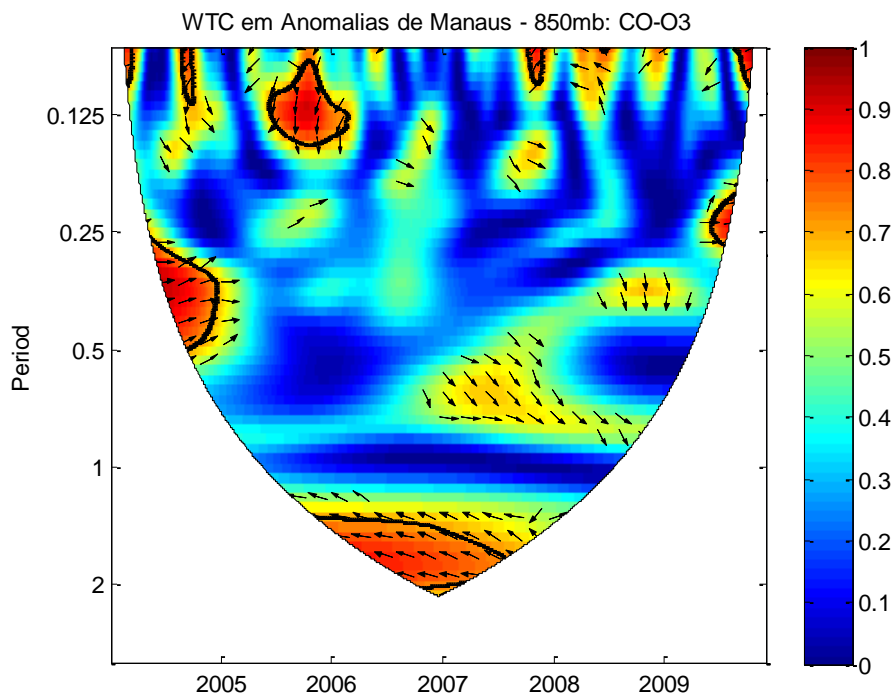


Figura 5.38 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O₃, no nível de 850 mb para a região de Manaus. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de anomalias de CO e O₃ estão em fase; para a esquerda, as séries de anomalias estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série anomalia de CO está adiantada da série de O₃ por até 90 graus e; para cima, o inverso.

As relações entre as variações na concentração de Co e O₃ sobre uma região de pastagem para diferentes níveis são apresentadas nas Figuras 5.39, 5.40, 5.41. No nível de 500 mb (Figura 5.39) para uma escala de tempo de 3 meses a 1 ano, as séries apresentam grande relação de dependência para todos os anos. Particularmente, na escala sazonal (3 meses) valores significativos de coerência são evidentes nos anos de 2004,2006 e 2008. Para todas as escalas a série de CO está praticamente em fase com a série temporal de O₃. Para os níveis de 750 e 850 mb (Figuras 5.40 e 5.41), um comportamento similar é notado para todas as escalas e período de estudo.

Assim, para todos os níveis de pressão (Figura 5.39, 5.40 e 5.41) considerando uma escala de tempo que varia de 3 meses a 1 ano as relações são significativas e se apresentam em fase. Além disso, quando comparamos essas análises em relação às análises sobre as regiões de floresta e cidade de Manaus, nota-se uma relação mais significativa sobre a pastagem. Isso pode estar associado ao fato que as queimadas são mais frequentes sobre pastagem.

Contudo, a fim de se investigar melhor essa relação, as análises a seguir mostram os resultados sobre a relação entre focos de queimadas e CO para o nível de 850 mb, para as três regiões citadas anteriormente: floresta, cidade de Manaus e pastagem.

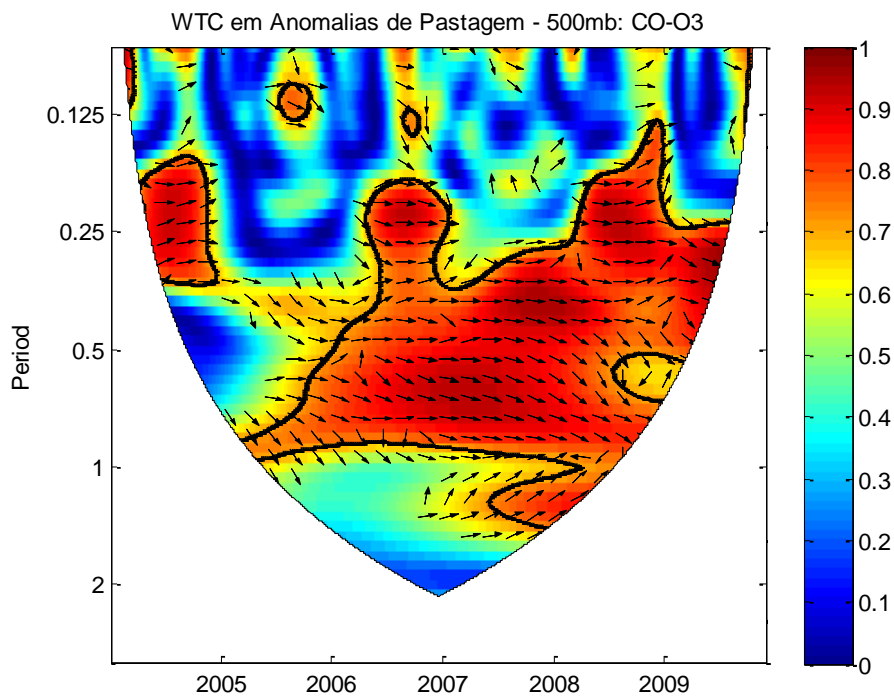


Figura 5.39 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O₃, no nível de 500 mb para a região de pastagem. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de anomalias de CO e O₃ estão em fase; para a esquerda, as séries de anomalias estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série anomalia de CO está adiantada da série de O₃ por até 90 graus e; para cima, o inverso.

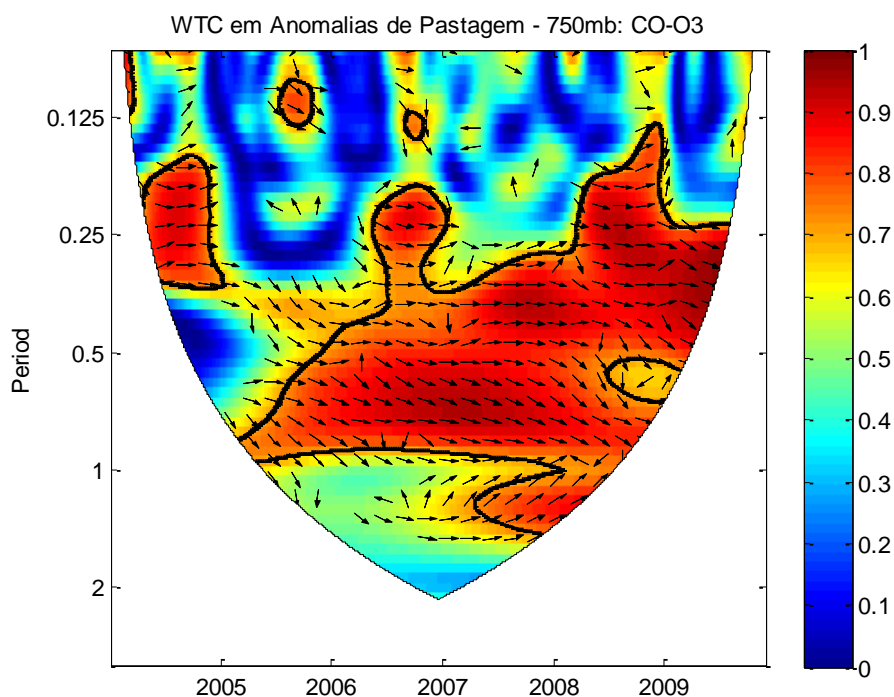


Figura 5.40 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O₃, no nível de 750 mb para a região de pastagem. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de anomalias de CO e O₃ estão em fase; para a esquerda, as séries de anomalias estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série anomalia de CO está adiantada da série de O₃ por até 90 graus e; para cima, o inverso.

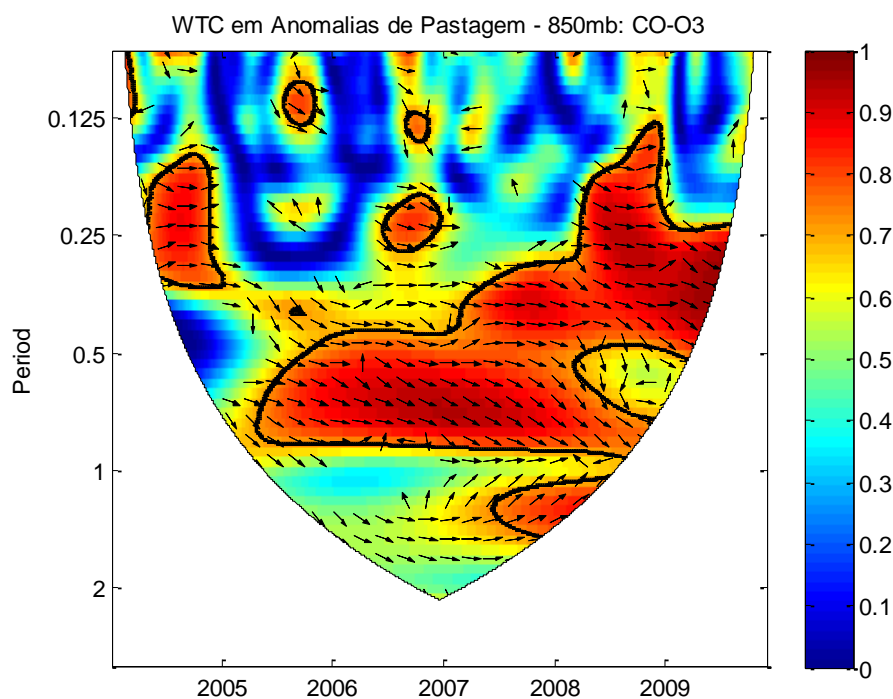


Figura 5.41 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de anomalias de CO e O₃, no nível de 850 mb para a região de Pastagem. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de anomalias de CO e O₃ estão em fase; para a esquerda, as séries de anomalias estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série anomalia de CO está adiantada da série de O₃ por até 90 graus e; para cima, o inverso.

As Figuras (5.42, 5.43 e 5.44) apresentam os resultados das análises de coerência e fase entre as séries de focos de queimadas e CO, sobre as regiões de floresta, cidade de Manaus e pastagem. Sobre região de floresta, (Figura 5.42) são notados valores significativos de coerência para a escala temporal semi-anual e anual (6 meses a um ano). Em relação à defasagem, para a escala semi-anual as variações ocorrem praticamente em fase, enquanto para a escala anual a série de queimadas permanece adiantada em até 45 graus em relação a de CO o equivale a aproximadamente 45 dias. Ainda, é notável uma relação significativa as séries para o ano de 2005 em uma escala de tempo entre 1,5 meses e 3 meses com a mesma defasagem apresentada para o mesmo período em escala superior de tempo a 3 meses.

Sobre a pastagem (Figura 5.43) valores significativos de coerência são encontrados desde a escala de 2 meses até 2 anos. A série de focos de queimadas ligeiramente adiantada em relação à série de CO. Por outro lado, somente para o ano de 2009, a relação de dependência é menos significativa que os demais anos, mas mesmo assim, apenas para um escala de tempo inferior a 6 meses.

A Figura 5.44 expõe os resultados encontrados sobre a relação entre as séries de queimadas e CO para a região de Manaus. Para uma escala de tempo igual um ano, todos os anos da série apresentaram coerências significativas com uma defasagem entre as séries de focos e queimadas e CO da ordem de 30 graus. Quando a escala de tempo é menor, a forte dependência é evidente para os anos de 2004 a 2006. Para os demais anos, na escala próxima a 6 meses, a relação não apresentou significância. Nessa escala – 6 meses – as séries estão em fase.

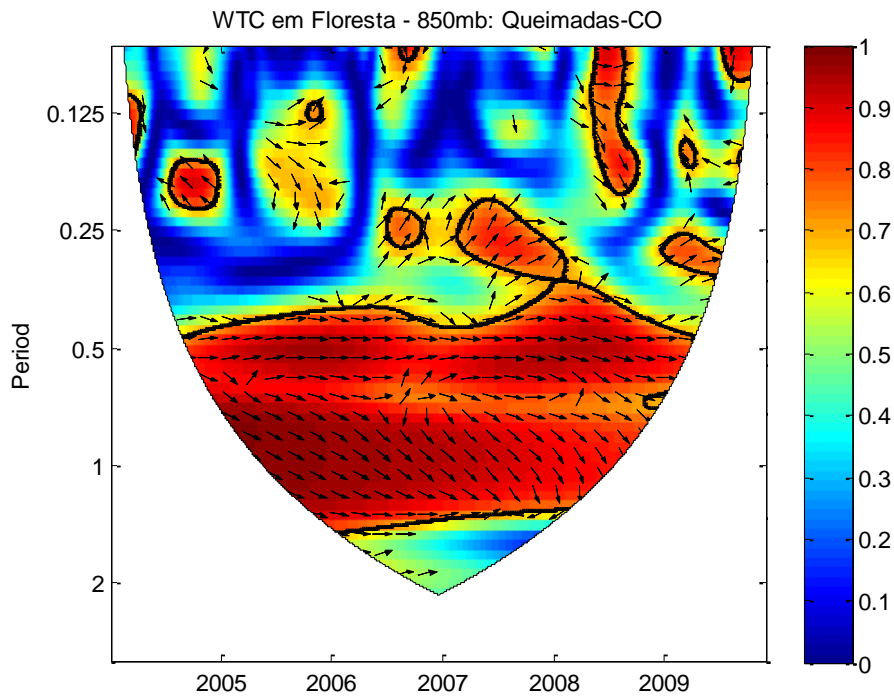


Figura 5.42 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de queimadas e CO em 850 mb para a região de floresta. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de queimadas e CO estão em fase; para a esquerda, as séries estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série de queimadas está adiantada da série de CO por até 90 graus e; para cima, o inverso.

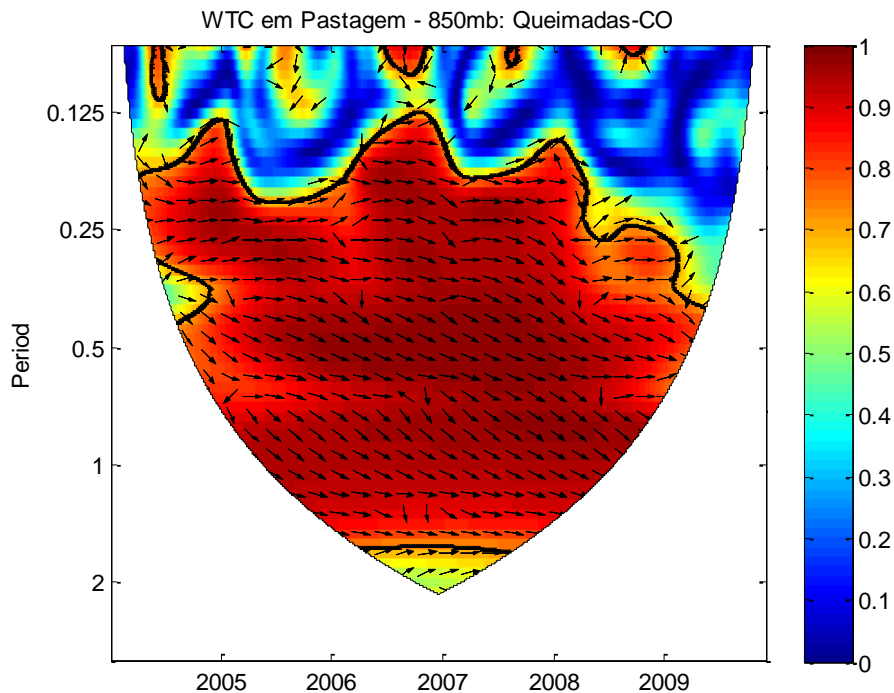


Figura 5.43 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de queimadas e CO em 850 mb para a região de pastagem. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de queimadas e CO estão em fase; para a esquerda, as séries estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série de queimadas está adiantada da série de CO por até 90 graus e; para cima, o inverso.

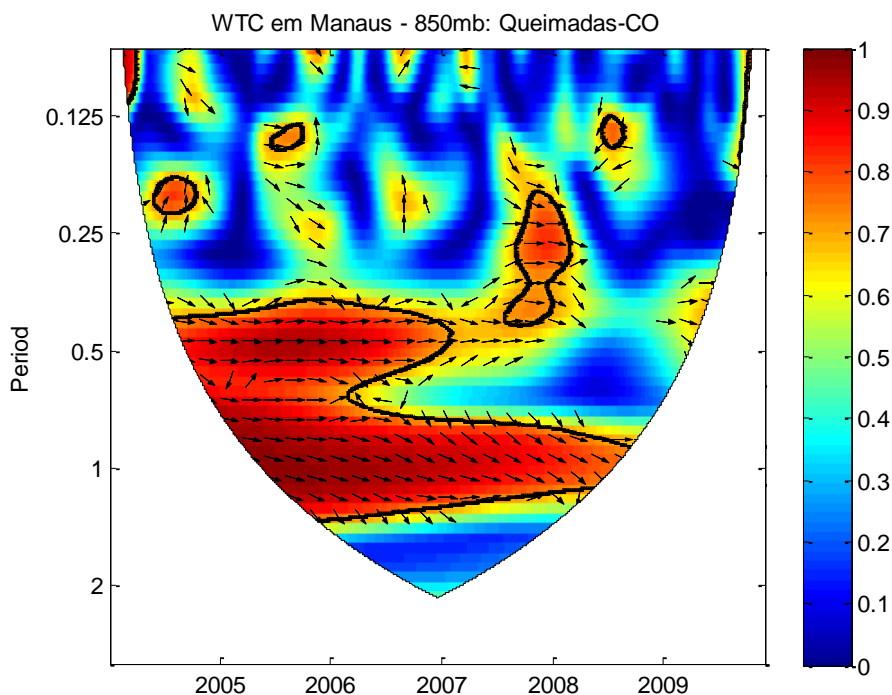


Figura 5.44 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de queimadas e CO em 850 mb para a região de Manaus. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de queimadas e CO estão em fase; para a esquerda, as séries estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série de queimadas está adiantada da série de CO por até 90 graus e; para cima, o inverso.

A Figura 5.45 apresenta a coerência e fase entre as relações de queimadas e O_3 para o nível de 500 mb, na região de pastagem. Apenas essa região e nesse nível de pressão, os resultados da análise apresentaram significância estatística entre essas duas séries. Esse fato pode ter ocorrido porque os focos de queimadas são mais frequentes nessa região. A série de queimadas está adiantada em até 90 graus em relação à série de O_3 para todos os anos em uma escala de tempo que varia de 3 meses a 1,5 anos. Para uma escala de tempo próxima a 4 meses, a dependência foi relativamente menor. Não houve significância estatística para uma escala de tempo inferior a 3 meses em nenhum ano da série.

Sumariando, os resultados sugerem a relação entre CO e O_3 em diferentes escalas de tempo. Em concordância com estudos anteriores, estes resultados mostram maior relação sobre a região de pastagem, que pode estar associado ao maior número de queimadas na região (Aires e Kirchhoff 2001).

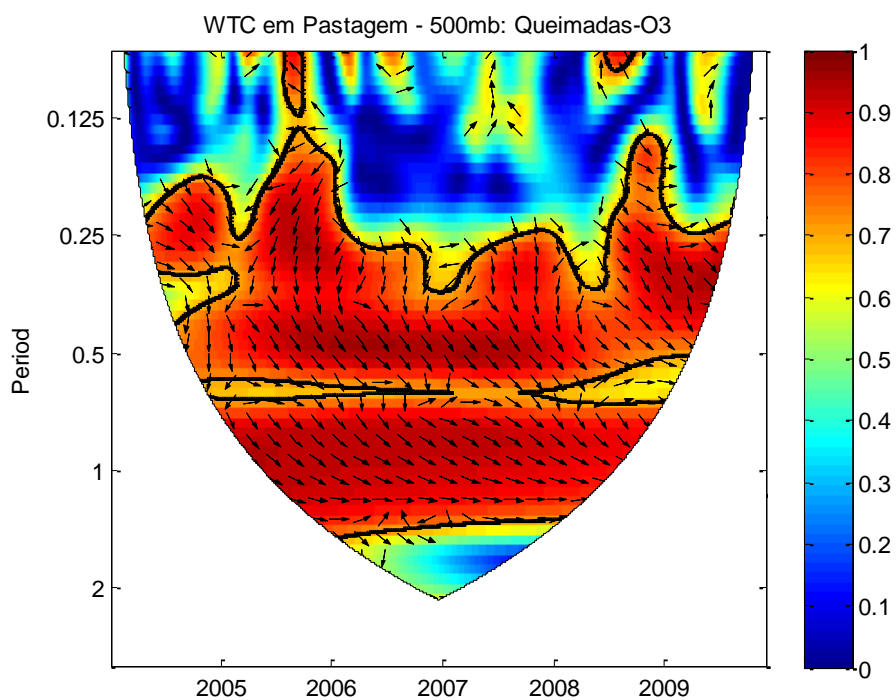


Figura 5.45 - Coerência (hachuras do azul ao vermelho, de acordo com a escala de valores) e diferença de fase da ondaleta (em setas) entre as séries de queimadas e O₃ em 500 mb para a região de Pastagem. Setas apontando para a direita, indicam que as séries de queimadas e CO estão em fase; para a esquerda, as séries estão fora de fase em até 180 graus; para baixo a série de queimadas está adiantada da série de CO por até 90 graus e; para cima, o inverso.

6. CONCLUSÃO

Relações entre as concentrações de CO e O₃, a dinâmica das queimadas e os volumes de precipitação, durante o período de 2003 a 2010, foram estudadas em três diferentes níveis de pressão e em três regiões distintas, usando técnicas estatísticas de análise exploratória de dados e análises de séries temporais.

Os resultados obtidos nas análises das concentrações de gases sugerem que os incrementos de O₃ observados sobre as regiões do estudo acompanham o aumento das concentrações de CO, em conformidade com trabalhos anteriores (Kirchhoff 1988; 1990; 1996). Os comportamentos dos gases nos três níveis estudados estão em consonância com os seus respectivos perfis atmosféricos. O O₃ apresenta uma função inversa com a pressão atmosférica, enquanto o CO apresenta uma relação direta.

Nas análises das concentrações dos gases observou-se, nos três níveis de pressão, para todas as paisagens, que há uma variabilidade e um ciclo sazonal bem definido. As concentrações crescem na estação seca e reduzem, progressivamente, os volumes na estação chuvosa. Esse ciclo corresponde ao ciclo das queimadas e, em sentido, inverso de sinais, ao ciclo de precipitação.

Um comportamento diferente foi detectado na série de CO e O₃ para as regiões de floresta e Manaus, no início de cada ano da série estudada, nos níveis de 750 mb e 850 mb. As concentrações destes gases vêm caindo lentamente com o início do período chuvoso quando os focos de queimadas estão bastante reduzidos, no entanto, um novo pulso na concentração é notado em fevereiro. Em seguida, já em março, as concentrações retomam a tendência de queda que vinha apresentando anteriormente, continuando o ciclo. Esse comportamento pode estar associado tanto com efeitos locais (emissão de precursores) quanto com efeitos remotos (transporte na vertical).

Além disso, as queimadas, em todas as regiões, são moduladas pela climatologia de precipitação. Durante a estação seca, os episódios de queima são observados com maior frequência e o salto no volume de focos acompanha o incremento nas concentrações de CO e

conseqüente de O_3 . Contudo, suas dinâmicas têm temporalidades diferentes, pois o máximo de focos é observado nos meses de agosto e setembro no Brasil Central, enquanto que no leste da Amazônia e parte oeste da região Nordeste, o máximo é registrado nos meses de outubro e novembro.

As concentrações de CO observadas sobre a região de pastagem seguem um ciclo que reproduz o ciclo das queimadas. O aumento no registro de focos de queimadas parece corresponder ao incremento de CO. Na região de floresta e Manaus os ciclos são compatíveis com a sazonalidade, entretanto, os volumes de queima de biomassa no entorno dessas regiões parecem não corresponder, proporcionalmente, ao incremento nas concentrações de CO. Isto sugere que há transporte facilitado pela circulação atmosférica de leste da região de estudo.

De maneira geral, pode-se notar que o maior número de focos de queimadas ocorre na região de pastagem, onde a produção agrícola e agropecuária é intensiva. As práticas e os mecanismos que facilitam as mudanças de uso da terra são fundamentalmente responsáveis pelas alterações nas concentrações de precursores de O_3 . Atividades humanas associadas ao processo de urbanização, também, tem sua parcela de contribuição originada na queima de combustíveis fósseis, contribuindo com o aumento da poluição atmosférica.

Além da variabilidade sazonal, as análises de coerência e fase entre as séries de CO e O_3 sugerem uma relação significativa para todas as regiões estudadas. A mais forte dependência foi observada para a região de pastagem, em escala temporal de 3 meses a um ano, para os anos de 2005 a 2009 e também, para um período de tempo menor que 0,3 anos para o ano de 2004. Para a região de Manaus, a dependência entre as séries de anomalias mostrou-se baixa, com alguns episódios ocorrendo esporadicamente ao longo do período estudado. Na região de floresta, para um período de tempo entre 0,5 a 1 ano há uma forte dependência para os anos de 2005 a 2007 e numa escala de tempo menor – 45 dias a 0,4 anos – essa forte relação revela-se para os anos de 2007 e 2008.

A relação entre as séries de queimadas e CO mostrou, novamente, a mais forte relação de dependência entre as séries, para uma escala de tempo superior a 3 meses e inferior a 1,5 anos para todos os anos. Para as regiões de Manaus e floresta, a forte dependência apresentou-

se numa escala de tempo entre 0,5 anos e 1,5 ano, para todos os anos, com respostas muito similares. Entretanto, só foi detectada significância entre as séries no nível de 850 mb.

Na análise de coerência e fase entre as séries de queimadas e O₃ foi detectada significância estatística apenas para a região de pastagem e somente no nível de 500 mb. Esse fato pode estar associado ao nível de maior concentração deste gás e ao maior número de focos de queimadas nessa região. Essa relação de forte dependência, ocorreu em todos os anos da série, em uma escala de tempo de 3 meses a 1,5 anos.

Ainda uma característica notável nas análises de coerência e fase entre as séries de anomalias de CO e O₃, entre queimadas e CO ou queimadas e O₃ foi a relação entre essas variáveis em diferentes escalas de tempo e entre elas a escala de tempo interanual. Para essa escala de tempo, os eventos de ENOS desempenham um papel fundamental na variabilidade climática do Brasil. Esses eventos de ENOS associados às variações nos episódios de queimadas sugerem que as variações climáticas podem afetar as concentrações desses gases. Neste contexto, as sondagens do satélite ambiental AQUA podem desempenhar um papel importante no monitoramento de áreas submetidas a condições ambientais favoráveis para formação de O₃.

Finalmente, estimativas remotas da concentração de gases traço podem auxiliar modelos de qualidade do ar, tanto na metodologia como na definição das condições de contorno e fronteira nas regiões estudadas, uma vez que os padrões e as tendências são consistentes.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se:

- Seja realizada a mesma investigação para estimativas remotas em superfície, comparando com medidas realizadas em experimentos de campo, incluindo também dados remotos de novas missões, por exemplo, o TROPOMI (“TROPOspheric Monitoring Instrument”) previsto para 2015.

- Analisar o comportamento diferenciado das estimativas próximas à superfície de CO e O₃ no trimestre inicial de cada ano, para as regiões de floresta e Manaus, comparando com medidas em superfície (torres), a fim de identificar episódios de transporte na vertical destes gases.

- Assimilar as estimativas remotas de CO em modelos de qualidade do ar que estimam as concentrações de O₃ na troposfera, particularmente em região de pastagem, a fim de avaliar o impacto desta assimilação nas previsões destes modelos.

7. REFERÊNCIAS

Aires, C. B. & Kirchhoff, V. W. J. H. 2001. Transporte de monóxido de carbono gerado em queimadas para regiões onde não se queima. *Brazilian Journal of Geophysics*. Vol. 19(1).

Armenteras, D.; Retana, J. 2012. Dynamics, Patterns and Causes of Fires in Northwestern Amazonia. *Plos One*. Vol. 7, issue 4, e35288.

Aumann, H.H.; Chahine, M. T.; Gautier, C.; Goldberg, M. D.; Kalnay, E.; McMillin, L. M.; Revercomb, H.; Rosenkranz, P. W.; Smith, W. L.; Staelin, D. H.; Strow, L. L.; Susskind, J. 2003. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41: 253-264.

Betts, A. K., L.V. Gatti, A.M. Cordova, M. A. F. Silva Dias, and J. Fuentes, 2002. Transport of ozone to the surface by convective downdrafts at night. *Journal Geophysical Research*. 107: 8046.

Bian, J.; Gettelman, A.; Chen, H.; Pan, L. L. 2007. Validation of satellite ozone profile using Beijing ozonesonde data. *Journal Geophysical Research*. 112: D06305.

Boian, C.; Kirchhoff, V. W. J.; Munger, J. W.; Saleska, S. R.; Wofsy, S. C. 2006. Very High Mixing Ratios at a Primary Forest Site. *Revista Brasileira de Meteorologia*. V. 21, n. 3a, 20-28.

Bussab, W.O.; Morettin, P.A. 2002. *Estatística Básica*. 5ª ed. São Paulo:Saraiva Editora.

D'amélio, M. T. S. 2006. Estudo de Gases de Efeito Estufa na Amazônia. Dissertação de Mestrado. *Universidade de São Paulo*. São Paulo, 178 pp.

Divakarla, M.; Barnet, C.; Goldberg, M.; Maddy, E.; Irion, F.; Newchurch, M.; Xingpin, L.; Wolf, W.; Flynn, L.; Labow, G.; Xiaozhen, X.; Jennifer, W.; Lihang, Z. 2008. Evaluation of Atmospheric Infrared Sounder ozone profiles and total ozone retrievals with matched ozonesonde measurements, ECMWF ozone data, and Ozone Monitoring Instrument retrievals. *Journal of Geophysical Research*. 113: D15.

Fisch, G. Climatic aspects of the Amazonia tropical forests. 1990. *Acta Amazonica*. 20: 39-48.

Fisch, G.; Marengo, J. A.; Nobre, C. A. 1998. Uma revisão geral do clima da Amazônia. *Acta Amazonica*. 28(2): 101-126.

Gettelman, A.; Weinstock, E. M.; Fetzer, E. J.; Irion, F. W.; Eldering, A.; Richard, E. C.; Rosenlof, K. H.; Thompson, T. L.; Pittman, J. V.; Webster, C. R.; Herman, R. L. 2004. Validation of Aqua satellite data in the upper troposphere and lower stratosphere with in situ aircraft instruments. *Journal Geophysical Research*. 31: L22107.

Grant, D.D., Fuentes, J.D., DeLonge, M.S., Chan, S., Joseph, E., Kucera, P., Ndiaye, S.A., Gaye, A.T. 2008. Ozone transport by mesoscale convective storms in western Senegal. *Atmos Environ*. 42: 7104–7114.

Guenther, A.; Hewitt, C. N.; Erickson, D.; Fall, R.; Geron, C.; Graedel, T.; Harley, P.; Klinger, L.; Lerdau, M.; Mckay, W. A.; Pierce, T.; Scholes, B.; Steinbrecher, R.; Tallamraju, R.; Taylor, J.; Zimmerman, P. 1995. A global model of natural volatile organic compounds emissions. *Journal of Geophysical Research*, 100, 8873–8892.

Guenther, A.; Baugh, B.; Brasseur, G.; Greenberg, J.; Harley, P.; Klinger, L.; Serca, D.; Vierling, L. 1999. Isoprene emission estimates and uncertainties for the Central African EXPRESSO study domain. *Journal of Geophysical Research*, 104, 30625–30639.

Hu, Xiao-Ming, Fuentes J.D., Zhang, Fuqing. Downward transport and modification of tropospheric ozone through moist convection. 2010. *J Atmos Chem*. 65:13–35. DOI 10.1007/s10874-010-9179-5.

Kirchhoff, Volker W. J. H. 1988. Surface Ozone Measurements in Amazonia. *Journal Geophysical Research*. 93: 1469-1476.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) – www.ibge.org.br.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) - www.inpe.br

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2001.

Kirchhoff, V. W. J. H.; Marinho, E. V. A. 1990. Surface Carbon Monoxide Measurements in Amazonia. *Journal Geophysical Research*. 95: 16.933-16.943.

Kirchhoff, V. W. J. H. 1996. Increasing concentrations of CO and O₃ rising deforestation rates and increasing tropospheric carbon monoxide and ozone in Amazonia. *Environmental Science and Pollution Research*.3: 210-212.

Logan, J. A.; Prather, M. J.; Wofsy, S. C.; McElroy, M. B. 1981. Tropospheric Chemistry: A Global Perspective. *Journal Geophysical Research*. 86: 7.210-7.254.

Logan, Jennifer A. Tropospheric Ozone: Seasonal Behavior, Trends, and Anthropogenic Influence. 1985. *Journal Geophysical Research*. 90: 10.463- 10.482.

Longo, K. M.; Thompson, A. M.; Kirchhoff, V. W. J. H.; Remer, L. A.; Freitas, S. R.; Dias, M. A. F. S.; Artaxo, P.; Hart, W.; Spinhirne, J. D.; Yamasoe, M. A. 1999. Correlation between smoke and tropospheric ozone concentration in Cuiabá during Smoke, Clouds, and Radiation – Brazil (SCAR-B). *Journal Geophysical Research*. 104: 12.113-12.129.

Marengo, J. A. 1992. Interannual Variability of surface climate in the Amazon Basin. *International Journal of Climatology*. Vol. 12, 853-863.

Martins, L. D. 2006. Sensibilidade da formação de ozônio troposférico às emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo. Tese de Doutorado. *Universidade de São Paulo*, São Paulo. 219 pp.

McMillin, W. W.; Barnet, C.; Strow, L.; Chahine, M. T.; McCourt, M. L.; Warner, J. X.; Novelli, P. C.; Korontzi, S.; Maddy, E. S. and Datta, S. 2005. Daily global maps of carbon monoxide from NASA's Atmospheric InfraRed Sounder. *Geophysical Research Letter*. 32: L11801.

Monahan, K. P.; Pan, L. L.; McDonald, A. J.; Bodeker, G. E.; Wei, J.; George, S. E.; Barnet, C. D.; Maddy, E. 2007. Validation of AIRS v4 profiles in the UTLS using ozonesondes from Lauder, NZ and Boulder, USA. *Journal Geophysical Research*. 112: D17304.

Moura, M. A. L.; Meixner, F. X.; Trebs, I.; Molion, L. C. B.; Nascimento Filho, M. F. 2004. Medições de NO – NO₂ – O₃ na Amazônia Central durante o experimento LBA/CLAIRE-2001. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 19: 49-58.

Rudolf B, Rubel F. 2005. Global precipitation. In *Observed Global Climate, New Series on Landolt-Bornstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, vol. 6 Hantel M (ed). Springer: Berlin, 11.1–11.24.

Rummel, U.; Ammann, C.; Kirkman, G. A.; Moura, M. A.; Foken, T.; Andreae, M. O.; Meixner, F. X. 2007. Seasonal variation of ozone deposition to a tropical rain forest in southwest Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 7: 5.415-5.435.

Sigler, J.M., Fuentes, J.D., Heitz, R.C., Garstang, M., Fisch, G. 2002. Ozone dynamics and deposition processes at a deforested site in the Amazon basin. *Ambio*. 3: 21–28.

Torrence, C.; Compo, G. P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 79: 61-78.

Torrence, C.; Webster, P. 1999. Interdecadal Changes in the ENSO–Monsoon System. *Journal of Climate*. 12: 2679-2690.

Trebs, I.; Mayol-Bracero, O. L.; Pauliquevis, T.; Kuhn, U.; Sander, R.; Ganzeveld, L.; Meixner, F. X.; Kesselmeier, J.; Artaxo, P.; Meinrat, O. A. 2012. Impact of the Manaus urban plume on trace gas mixing ratios near the surface in the Amazon Basin: Implications for the NO-NO₂-O₃ photostationary state and peroxy radical levels. *Journal of Geophysical Research*. 117: D05307.

Wilks, D.S. 2006. *Theoretical probability distribution. Inc. Statistical methods in the atmospheric sciences*. San Diego: Academic Press. 592p

Yurganov, L. N.; McMillan, W. W.; Dzhola, A. V.; Grechko, E. I.; et al. 2008. Global AIRS and MOPITT CO measurements: Validation, comparison, and links to biomass burning variations and carbon cycle. *Journal of Geophysical Research*. 113: D09301.