

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

André Gomes Penaforte

**RELAÇÃO ENTRE EXPANSÃO AGRÍCOLA EM ÁREAS
DE CAATINGA E CONDIÇÕES ANÔMALAS DE
RADIOPROPAÇÃO**

Campina Grande, fevereiro de 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**RELAÇÃO ENTRE EXPANSÃO AGRÍCOLA EM ÁREAS DE
CAATINGA E CONDIÇÕES ANÔMALAS DE RADIOPROPAGAÇÃO**

ANDRÉ GOMES PENAFORTE

ORIENTADORA: MAGALY DE FATIMA CORREIA

CAMPINA GRANDE – PB
FEVEREIRO DE 2020

ANDRÉ GOMES PENAFORTE

**RELAÇÃO ENTRE EXPANSÃO AGRÍCOLA EM ÁREAS DE
CAATINGA E CONDIÇÕES ANÔMALAS DE RADIOPROPAGAÇÃO**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, seguindo às exigências para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escala

Subárea: Radioclimatologia

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO DE 2020

P397r

Penaforte, André Gomes.

Relação entre expansão agrícola em áreas de Caatinga e condições anômalas de radiopropagação / André Gomes Penaforte. - Campina Grande, 2020.

87 f. : il. Color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.

"Orientação: Profa. Dra. Magaly de Fatima Correia".

Referências.

1. Meteorologia de Meso. 2. Componente Úmida de Refratividade. 3. Radioclimatologia. 4. Radiopropagação. 5. Expansão Agrícola. I. Correia, Magaly de Fatima Correia. II. Título.

CDU 551.515.6(043)

ANDRÉ GOMES PENAFORTE

RELAÇÃO ENTRE EXPANSÃO AGRÍCOLA EM ÁREAS DE CAATINGA E
CONDIÇÕES ANÔMALAS DE RADIOPROPAGAÇÃO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2020

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dra. VIRGINIA DE FATIMA BEZERRA NOGUEIRA
Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser meu refúgio nas horas mais difíceis e importantes da minha vida, mostrando os caminhos nas horas incertas e certas, me concedendo paciência nas horas de dificuldades, sabedoria para conseguir superar os obstáculos da vida e me suprimindo em todas as minhas necessidades.

Aos meus pais, por ter me apoiado todos os dias, dedicando a meu bem-estar e educando. Agradecendo de coração a eles, José Nildo Penaforte e Francinalda Gomes de Araújo.

A todos os meus professores e, em especial à minha orientadora Dr.^a Magaly de Fatima Correia, que me ajudou a ter uma visão totalmente diferente da Meteorologia, fazendo com que eu tenha um orgulho e dedicação ao que estou fazendo e empenhando a estudar e pesquisar cada vez mais. Gratidão!

Agradeço a todos meus amigos pela ajuda e compreensão nos momentos difíceis, pelas ricas discussões, pelo constante apoio, pelas diversões nos momentos de alegrias e por tantas outras coisas que, por vezes, somente bons amigos podem fazer por nós.

A minha namorada, pelo companheirismo e amizade, por está sempre apoiando e incentivando a nunca desistir dos meus planos e objetivos.

Ao programa de pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); e a Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio concedido para a concretização desse trabalho;

Enfim, agradeço a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para minha qualificação profissional.

OBRIGADO!

RESUMO

As inovações tecnológicas no setor de telecomunicações permitiram a utilização de redes de transmissão de dados mais eficazes, possibilitando atender com maior eficiência à demanda crescente pela conexão de dispositivos e equipamentos sem o uso de cabos (sem fio), em diferentes áreas de aplicação. No entanto, no planejamento de um sistema de rede sem fio é importante considerar a influência da atmosfera na trajetória das ondas radioelétricas. O aumento no conhecimento sobre os fenômenos da difração, refração (desvios na trajetória das ondas), e atenuação por nuvens e chuva se torna relevante devido à associação com perturbações atmosféricas e ocorrências de desvanecimento ou perda do sinal. O atraso ou perda dos sinais radioelétricos pode interferir nas atividades humanas, causando impacto social ou econômico significativo. Neste contexto, essa pesquisa tem como objetivo investigar de que maneira a expansão da agricultura irrigada em áreas do bioma Caatinga altera o padrão local da refratividade. Nas análises foram utilizadas imagens do satélite Landsat-5 (TM), séries históricas de dados coletados nas estações meteorológicas de superfície de Petrolina (PE), Bebedouro (PE) e Mandacaru (BA), e dados de sondagens de ar superior realizadas em Petrolina (PE). Os resultados mostraram que o aumento no teor de umidade na área dos perímetros irrigados em Bebedouro-PE e Mandacaru-BA tem influência direta na componente úmida de refratividade (Nu). Descontinuidades na superfície resultantes de mudanças na cobertura e uso do solo são fatores importantes na variabilidade do teor de vapor na baixa troposfera. Na escala regional elas podem causar distorções na propagação e na intensidade de sinais radioelétricos. A expansão da agricultura irrigada na região do polo agrícola Juazeiro-Petrolina representa uma importante fonte de umidade na baixa troposfera e, em consequência, de intensificação do gradiente horizontal da componente úmida de refratividade (Nu). Núcleos de umidade e Nu mais elevados caracterizam a geração de microclimas na área de Petrolina e Juazeiro.

Palavras-chave: Componente úmida de refratividade, radiopropagação, expansão agrícola.

ABSTRACT

The innovations in technology in the telecommunications sector allowed the use of more efficient data transmission networks, making possible to attend with more efficiency the increasing need for wireless connexion of dispositives and equipments, in different areas of application. However, in the planning of a wireless network system it is important to consider the influence of the atmosphere in the trajectory of the radioelectric waves. The increase in knowledge about the phenomena of diffraction, refraction (deviations in the trajectory of the waves), and attenuation by clouds and rain becomes relevant due to the association with atmospheric disturbances and occurrences of fading or signal loss. The delay or loss of radioelectric signals may interfere in human activities, causing significant social or economical impact. In this context, the objective in this research is to investigate in which manner the expansion in irrigated agriculture in areas of the Caatinga biome changes the local refractivity pattern. Landsat-5 (TM) satellite images, historical series of data collected in the surface meteorological stations of Petrolina (PE), Bebedouro (PE) and Mandacaru (BA), and data of upper air soundings made at Petrolina (PE). The results show that the increase in the moisture content in the area of the irrigated perimeters of Bebedouro-PE and Mandacaru-BA has a direct influence on the wet term of refractivity (N_w). Surface discontinuities resulting from changes in soil coverage and use are important factors in the variability of the vapour content in the low troposphere. On the regional scale, they may cause distortions in the propagation and intensity of the radioelectric signals. The expansion in irrigated agriculture in the region of Juazeiro-Petrolina represents an important source of moisture in the low troposphere and, as a consequence, of intensification of the horizontal gradient of the wet term of refractivity (N_w). Nuclei of higher moisture and N_w characterize the generation of microclimates in the area of Petrolina and Juazeiro.

Keywords: wet term of refractivity, radiopropagation, agricultural expansion.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição das características do satélite Landsat-5 (Fonte: INPE).....	37
Tabela 2. Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do Landsat-5, com os correspondentes intervalos de comprimentos de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiância solar espectral no topo da atmosfera (K_{λ_i}).....	38
Tabela 3. Área equipada para Irrigação na Região Nordeste. Fonte: Modificado de ANA (2017).....	46
Tabela 4. Resultados da análise de variância aplicada à razão de mistura para série de Petrolina-PE, com $\alpha = 0,05$, para razão de mistura. Fcrítico = 4,0981. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$	50
Tabela 5. Resultados da análise de variância aplicada à razão de mistura para série de Bebedouro-PE, com $\alpha = 0,05$, para razão de mistura. Fcrítico = 4,0981. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$	51
Tabela 6. Resultados da análise de variância aplicada à razão de mistura para série de Mandacaru-BA, com $\alpha = 0,05$, para razão de mistura. Fcrítico = 4,0981. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$	52
Tabela 7. Resultados da análise de variância aplicada à componente úmida de refratividade para série de Petrolina-PE, com $\alpha = 0,05$, para componente úmida de refratividade. Fcrítico = 4,0981. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$	54
Tabela 8. Resultados da análise de variância aplicada à componente úmida de refratividade para série de Bebedouro-PE, com $\alpha = 0,05$, para componente úmida de refratividade. Fcrítico = 4,0981. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$	55
Tabela 9. Resultados da análise de variância aplicada à componente úmida de refratividade para série de Mandacaru-BA, com $\alpha = 0,05$, para componente úmida de refratividade. Fcrítico = 4,0981. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$	56

Tabela 10. Distribuição das ocorrências das camadas atmosféricas com gradientes anômalos de refratividade.	67
--	-----------

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Distribuição espacial de Nu (u -refratividade) e r (g/kg) resultante da diferença entre as simulações “*com irrigação*” e “*sem irrigação*” no domínio da grade 2 (resolução: 2km) as 15 HL. As áreas coloridas representam o lago de Sobradinho, o rio São Francisco e os perímetros irrigados (Bebedouro, Nilo Coelho, Curaça, Maniçoba, Tourão e Mandacaru). Fonte: Modificado de Correia, et. al., (2013).....**26**
- Figura 2.** Localização geográfica do Brasil com destaque para a região nordeste (coloração marron) e Petrolina-PE (coloração verde). Fonte: autor..... **28**
- Figura 3.** Avião Boeing 747-8F da empresa luxemburguesa Cargolux Airlines International SA (Cargolux). Fonte: Divulgação/Infraero..... **29**
- Figura 4.** Condições de propagação do feixe de ondas do Radar Meteorológico. Adaptado de tutorial sobre radar do Serviço Meteorológico Nacional NOAA dos EUA, (<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/doppler/beam_max.htm>) **32**
- Figura 5.** Representação teórica do blox-plot para um conjunto de dados **33**
- Figura 6.** Médias mensais da precipitação em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE obtida no período de 1975-2014. Fonte de dados: Embrapa Semiárido e INMET **40**
- Figura 7.** Médias mensais da umidade relativa em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE obtida no período de 1975-2014. Fonte de dados: Embrapa Semiárido e INMET.. **41**
- Figura 8.** Médias mensais da componente úmida da Refratividade em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE obtida no período de 1975-2014. Fonte de dados: Embrapa Semiárido e INMET..... **42**
- Figura 9.** Distribuição espacial do NDVI no dia 17 de dezembro de 1993, com foco em áreas de agricultura irrigadas (a) Bebedouro e (b) Mandacaru.....**43**
- Figura 10.** Distribuição espacial do NDVI no dia 22 de janeiro de 2007, com foco nas áreas de agricultura irrigadas (a) Bebedouro e (b) Mandacaru.....**44**
- Figura 11.** Variabilidade da distribuição da refratividade (Nu) para (a) Bebedouro, (b) Mandacaru e (c) Petrolina no período de 1975 a 2014. Fonte de dados: Embrapa Semiárido e

INMET.....	45
Figura 12. Evolução temporal da área irrigada no Estado da Bahia. Fonte: Silva Paz, et. al., (2003).....	47
Figura 13. Médias mensais da razão de mistura, no período 1975-1994 e 1995-2014 para (a) Petrolina-PE, (b) Bebedouro-PE e (c) Mandacaru-BA.....	59
Figura 14. Médias mensais da componente úmida de refratividade, no período 1975-1994 e 1995-2014 para (a) Petrolina-PE, (b) Bebedouro-PE e (c) Mandacaru-BA.....	60
Figura 15. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de janeiro nos períodos 1975-1994 e 1995-2014 em: (a) Petrolina PE, (b) Bebedouro (PE) e (c) Mandacaru (BA).....	62
Figura 16. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de fevereiro nos períodos 1975-1994 e 1995-2014 em: (a) Petrolina PE, (b) Bebedouro (PE) e (c) Mandacaru (BA).....	63
Figura 17. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de agosto nos períodos 1975-1994 e 1995-2014 em: (a) Petrolina PE, (b) Bebedouro (PE) e (c) Mandacaru (BA).....	64
Figura 18. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de setembro nos períodos 1975-1994 e 1995-2014 em: (a) Petrolina PE, (b) Bebedouro (PE) e (c) Mandacaru (BA).....	65
Figura 19. Perfis verticais do índice de refração modificado, da razão de mistura e das temperaturas do ar e do ponto de orvalho as 12 UTC para: 26 de janeiro de 2007 (a,b,c) e 31 de janeiro de 2007 (d,e,f).....	68
Figura 20. Configuração espacial da refratividade (Nu) para os meses de janeiro e fevereiro da série das normais climatológicas de 1961-1990: (a) e (c) sem a inclusão de Bebedouro e Mandacaru; (b) e (d) com a inclusão de Bebedouro e Mandacaru, a área delimitada pelo quadrado tracejado com coloração preto representa a região de estudo (equivalendo de 8 a 10 ° S e 40 a 42 ° W).....	69
Figura 21. Configuração espacial da refratividade (Nu) para os meses de setembro e outubro da série das normais climatológicas de 1961-1990: (a) e (c) sem a inclusão de Bebedouro e Mandacaru; (b) e (d) com a inclusão de Bebedouro e Mandacaru, a área delimitada pelo quadrado tracejado com coloração preto representa a região de estudo (equivalendo de 8 a 10 ° S e 40 a 42 ° W).....	70
Figura 22. Configuração espacial da refratividade (Nu) para os meses de janeiro e fevereiro da série das normais climatológicas de 1981-2010: (a) e (c) sem a inclusão de Bebedouro e Mandacaru; (b) e (d) com a inclusão de Bebedouro e Mandacaru, a área delimitada pelo	

quadrado tracejado com coloração preto representa a região de estudo (equivalendo de 8 a 10 ° S e 40 a 42 ° W).....71

Figura 23. Configuração espacial da refratividade (Nu) para os meses de setembro e outubro da série das normais climatológicas de 1981-2010: (a) e (c) sem a inclusão de Bebedouro e Mandacaru; (b) e (d) com a inclusão de Bebedouro e Mandacaru, a área delimitada pelo quadrado tracejado com coloração preto representa a região de estudo (equivalendo de 8 a 10 ° S e 40 a 42 ° W).....72

Figura 24. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de março nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).....81

Figura 25. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de abril nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).....82

Figura 26. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de maio nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).....83

Figura 27. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de junho nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).....84

Figura 28. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de julho nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).....85

Figura 29. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de outubro nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).....86

Figura 30. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de novembro nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).....87

Figura 31. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de dezembro nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).....**88**

LISTA DE QUADRO

- Quadro 1.** Frequências utilizadas nas redes de telecomunicações. Fonte: Adaptado de LIMA JUNIOR, 2003.....**24**
- Quadro 2.** Análise de rejeição da hipótese nula (H_0) para razão de mistura, r (g/kg) e para o termo úmido da refratividade atmosférica, N_u (Unid. De Ref.).....**57**

LISTA DE ABREVIATURAS

- INPE** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- PA** - Propagações Anômalas
- ZCIT** - Zona de Convergência Intertropical
- VCAN** - Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
- NDVI** - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
- CCM** - Complexo Convectivo de Mesoescala
- CLA** - Camada Limite Atmosférica
- DS** - Dutos de Superfície
- VALEEXPORT** - Associação dos Produtores Exportadores de Hortigranjeiros e Derivados do Vale do São Francisco
- IBGE** - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- INMET** - Instituto Nacional de Meteorologia
- CPATSA/EMBRAPA** - Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- CPTEC** - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- NU** - Componente Úmida da Refratividade
- DGI** - Divisão de Geração de Imagens
- ND** - Número Digital
- R_n** - Radiação da Superfície
- TM** - Mapeador Temático
- R²** - Coeficiente de Determinação
- ANOVA** - Análise de Variância Fator Único

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	199
2. OBJETIVOS	221
2.1 Objetivo geral	21
2.2 Objetivos específicos	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	221
3.1 Sistemas meteorológicos atuantes no Nordeste brasileiro	21
3.2 Propagação Anômala (PA).....	23
3.3 Sensoriamento Remoto como método de avaliação de mudanças na cobertura do solo.....	26
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1 Características da Região de Estudo	27
4.2 Dados	29
4.3 Metodologia.....	30
4.3.1 Refração atmosférica e condições anômalas de propagação.....	30
4.3.2 Variabilidade espacial e temporal da refratividade (N).....	32
4.3.3 O Box-Plot.....	33
4.3.4 Análise Estatística.....	34
4.3.5 Análise de variância com fator único (ANOVA).....	34
4.3.6 Sensoriamento remoto	36
4.3.6.1 Calibração radiométrica.....	37
4.3.6.2 Reflectância.....	38
4.3.7 Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NVDI)	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1 Aspectos Climatológicos da Região de Estudo.....	40
5.2 Sensoriamento Remoto.....	42
5.3 Análises Estatísticas.....	44
5.4 Redução de Efeitos Causados por outros fatores.....	47
5.5 Razão de Mistura.....	48

5.6	Componente Úmida de Refratividade (Nu)	53
5.7	Varição média mensal da razão de Mistura (r) e da refratividade (Nu)	57
5.8	Relação entre Umidade Atmosférica e Componente úmida da Refratividade...	61
5.9	Estatística de Dutos Atmosféricos.....	65
5.10	Distribuição espacial da componente úmida da refratividade.....	68
6.	CONCLUSÕES.....	74
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
8.	ANEXO A.....	81

1. INTRODUÇÃO

Os avanços dos meios de comunicação permitiram a utilização de novas tecnologias com transmissões mais eficazes, possibilitando atender com maior eficiência diversas demandas de usuários (rádio, televisão, celular, internet etc.). A comunicação sem fio ganhou notoriedade na transmissão de dados, antes utilizadas essencialmente em comunicações a longa distância, através de satélites. Vários aspectos foram importantes nessa evolução, no entanto, os avanços da informática e de sensores de transmissões foram decisivos para o desenvolvimento em escalas distintas (Roza, 2006).

No Brasil, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) ocupa uma posição de destaque entre as grandes nações que possuem tecnologia computacional capazes de manter uma base de dados atualizados obtidos por meio de sistemas de medições via satélite, sondas e plataformas terrestres e marítimas.

Um sistema de comunicação de dados sem fio utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência ou rádio frequência e reduz a necessidade de conexão cabeada. No entanto, para que a transmissão de dados tenha êxito, é importante alcançar distorções mínimas na propagação do sinal. Como o meio de transmissão é constituído pela superfície terrestre e a atmosfera, a qualidade do sinal depende tanto das características do terreno (cobertura da superfície e relevo) quanto das condições dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera, altamente variáveis.

Na troposfera, camada atmosférica com espessura entre a superfície e o topo de aproximadamente 15 km, tem-se a maior concentração de vapor d'água. Neste aspecto, em função da grande variação vertical da temperatura e umidade do ar nesta camada, a refração se destaca como principal efeito ambiental com impacto na trajetória das ondas de rádio. O fenômeno de refração ocorre quando as ondas eletromagnéticas sofrem desvios decorrentes de variações no índice de refração atmosférica.

No planejamento de um sistema de rádio visibilidade é importante considerar os efeitos dos seguintes fenômenos: difração resultante de obstruções pela existência de barreiras no percurso; atenuação por gases na atmosfera; desvanecimento (fading) causado por camadas anômalas de refração; desvanecimento por reflexões de ondas em superfície e atenuação por chuva. Atrasos ou perdas de sinais radioelétricos podem interferir na prática de atividades importantes em setores essenciais para a economia regional, tais como: nos aeroportos e portos, na previsão do tempo e no agronegócio.

O radar Meteorológico é um exemplo de sistemas de alto desempenho amplamente utilizados em gerenciamento de recursos hídricos e que opera na faixa de microondas. A utilização desses equipamentos no gerenciamento e monitoramento de recursos ambientais permite a coleta e transmissão de informações sobre distribuição espacial, intensidade, profundidade e deslocamento de células precipitantes sem a necessidade de cabos ou fios (Correia, et. al., 2018).

A aplicação de algoritmos sofisticados, nas variáveis obtidas com radares de última geração possibilita eliminar virtualmente a presença de alvos falsos, retorno do solo na tela de visualização e propagações anômalas. No entanto, é importante ressaltar que apesar da tecnologia avançada, ainda ocorrem situações em que os dados apresentam contaminações (ruídos). Ecos falsos, por exemplo, normalmente ocorrem em situações de propagações anômalas (PA) em que o feixe do radar é desviado em direção ao solo, em grande parte provocada por inversões térmicas ou descontinuidades do vapor de água na baixa atmosfera.

Processos advectivos (transporte horizontal de massa de ar) são particularmente importantes na transmissão e recepção de sinais na faixa de microondas. As transferências de massa (vapor) e energia resultantes da interação entre a superfície terrestre e o ar vizinho modifica a estratificação térmica das camadas mais baixas da atmosfera e leva a condições atmosféricas com diferentes características refrativas (sub-refração, super-refração, dutos de superfície e dutos elevados).

As inversões de temperatura representam um dos principais mecanismos de formação de dutos atmosféricos em regiões de latitudes altas. Em latitudes tropicais, geralmente as inversões térmicas não são tão intensas para gerar as condições necessárias para a formação de dutos a não ser quando estão relacionadas com a estratificação da umidade na vertical (Bean & Dutton, 1968; Amorim et. al., 1998, Patel, 2001; Chaves Filho, et. al., 2013).

Mudanças na cobertura e uso da terra estão entre as ações antrópicas de maior impacto no balanço de energia em superfície, processos de interação superfície-atmosfera e na estrutura vertical de vapor e temperatura na camada limite atmosférica (Correia, 2001; Correia et al, 2006). Transformações ambientais decorrentes dos usos múltiplos do reservatório da Usina Hidrelétrica de Sobradinho estão entre os principais fatores responsáveis por mudanças na umidade e temperatura da baixa atmosfera. Neste contexto, o desenvolvimento dessa pesquisa tem como meta investigar o grau de influência da expansão agrícola em áreas de caatinga na mudança do padrão da refratividade atmosférica e ocorrência de condições anômalas de propagação.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto da expansão agrícola no padrão espacial do índice de refração atmosférica e no desenvolvimento de condições anômalas de radiopropagação.

2.2 Objetivos específicos

1. Investigar como a expansão de áreas irrigadas no bioma caatinga podem impactar a variação horizontal da umidade, temperatura e refratividade atmosférica na região da Usina Hidrelétrica de Sobradinho;
2. Analisar a influência de mudanças na estrutura termodinâmica da camada limite atmosférica no gradiente vertical de refratividade;
3. Avaliar o potencial dos índices NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada), como indicadores de mudanças na cobertura e uso da terra.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistemas meteorológicos atuantes no semiárido da região do nordeste brasileiro

A precipitação é a variável meteorológica mais importante em análises sobre planejamento e gestão de recursos hídricos no semiárido brasileiro. Dentre os principais mecanismos dinâmicos produtores de chuva na região destacam-se: a zona de convergência intertropical (ZCIT), os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) e os sistemas frontais.

Os VCANs são sistemas transientes cuja atuação produz alta variabilidade da precipitação. A distribuição espacial e intensidade das chuvas tem relação direta com posicionamento geográfico do sistema. Embora capazes de alterar de forma significativa as condições de tempo numa região por vários dias e com ocorrência predominante no mês de janeiro, não existe uma região preferencial de atuação. As áreas sob influência desses sistemas podem apresentar atividade convectiva intensa e desenvolvimento de nuvens profundas, na periferia do VCAN ou baixa atividade convectiva e poucas nuvens decorrentes dos movimentos verticais descendentes encontrados no centro do VCAN (Kousky & Gan, 1981; Alves, 2001).

A ZCIT é considerada como sendo o principal sistema produtor de chuva na região. Dependendo da intensidade e principalmente da sua permanência mais ao sul da sua posição normal está diretamente associada a qualidade do período chuvoso. Na faixa do Atlântico, sua posição mais ao norte ocorre nos meses de agosto e setembro, atingindo aproximadamente 15° N, enquanto a posição mais ao sul de aproximadamente 2° S, acontece entre os meses de março e abril. Segundo Uvo, (1989), no ano de 1985 a posição atingida por esse sistema foi de aproximadamente 6° S, permanecendo nessa posição durante um período superior à média, provocando um índice pluviométrico elevado em toda região do Nordeste.

Silva et. al. (2017) a partir de séries históricas de dados coletados na rede do INMET situadas no Nordeste do Brasil analisaram intensidade, duração e frequência (IDF) da precipitação. Na seleção de dados foram escolhidas estações que apresentaram séries históricas com, no mínimo, 15 anos de observações diárias ininterruptas. Verificaram que os maiores valores de precipitações estavam relacionados com atuação da ZCIT.

Um outro aspecto interessante da influência dos sistemas atmosféricos na distribuição de chuvas, é o efeito da interação entre dois ou mais sistemas. Coutinho et. al, (2017) estudaram um evento extremo ocorrido no estado do Ceará, com registro de diversos transtornos ambientais e estruturais, tais como, deslizamento de terras, alagamentos, e danos materiais. Os resultados indicam que a intensidade do evento resultou da atuação simultânea de um VCAN e um distúrbio de leste. A chuva em Fortaleza superou a média histórica para o mês de janeiro, que atingiu 132 mm, outras 29 cidades cearenses de regiões como o Cariri, Inhamuns e Ibiapaba, também tiveram precipitação acima da média.

Lyra et. al, (2019) analisaram o impacto da influência simultânea de um sistema frontal e da ZCIT na região nordeste do Brasil na ocorrência de evento extremo de precipitação. Os resultados indicaram que a influência conjunta dos dois sistemas resultou na formação de um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM). Altos volumes de precipitação foram registrados não só durante a passagem do CCM, mas também no dia anterior devido a ZCIT.

3.2 Propagação Anômala (PA)

Ao estudarmos os conceitos físicos da óptica entendemos que o fenômeno de refração nada mais é que um desvio do feixe da onda, ou seja, sua propagação é alterada no meio onde a onda se propaga. Então a refração (refratividade) atmosférica pode ser definida como o desvio da onda eletromagnética no meio de propagação.

Propagação anômala (PA) define qualquer tipo de gradiente de refratividade fora do padrão (sub-refração, super-refração e dutos). São situações decorrentes de mudanças repentinas nos campos de umidade, temperatura e pressão capazes de alterar a trajetória da propagação das ondas radielétricas.

Advecção de umidade, evapotranspiração, resfriamento radiativo e atividade convectiva estão entre os principais mecanismos responsáveis pela formação dos dutos atmosféricos de superfície (Amorim et. al, 1998). Em escala local, circulações induzidas termicamente, tais como, as brisas marítimas, terrestres, lacustres e de vale-montanha, contribuem de forma substancial no transporte de umidade e variação na refratividade atmosférica.

Dutos resultantes do processo de evaporação tem efeitos danosos em equipamentos de micro-ondas, particularmente na faixa acima de 3 GHz (Shi et al., 2015a, 2015b). Neste sentido, os efeitos potenciais de dutos de evaporação em produtos de radares meteorológicos que operam em áreas litorâneas ou próximas de grandes reservatórios de água não devem ser desprezados. No quadro 1 é apresentado as frequências (Hz) e suas aplicações nas redes de telecomunicações.

Quadro 1. Frequências utilizadas nas redes de telecomunicações. Fonte: Adaptado de LIMA JUNIOR, 2003.

FAIXA DE FREQUÊNCIA (Hz)	DENOMINAÇÃO TÉCNICA	DENOMINAÇÃO POPULAR	EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO
300 a 3000	E.L.F (Extremely Low Frequency)	Ondas Extremamente Longas	Comunicações para submarinos, escavações de minas, etc.
3k a 30k	V.L.F (Very Low Frequency)	Ondas Muito Longas	Comunicações para submarinos, escavações de minas, etc.
30k a 300k	L.F (Low Frequency)	Ondas Longas	Auxílio à navegação aérea, serviços marítimos e radiodifusão local.
300k a 3M	M.F (Médium Frequency)	Ondas médias	Auxílio à navegação aérea, serviços marítimos e radiodifusão local.
3M a 30M	H.F (High Frequency)	Ondas tropicais/ ondas curtas	Radiodifusão local e distante, sistemas marítimos (estações costeiras).
30M a 300M	V.H.F (Very High Frequency)	Micro-ondas	Transmissão de TV, sistemas comerciais e particulares de comunicação, serviços de segurança pública (Polícia, Bombeiros, etc).
300M a 2G	U.H.F (Ultra High Frequency)	Micro-ondas	Transmissão de TV, sistemas comerciais e particulares de comunicação, serviços de segurança pública (Polícia, Bombeiros, etc).
2G a 3G	U.H.F (Ultra High Frequency)	Micro-ondas	Comunicação pública a longa distância: sistemas interurbanos e internacionais em rádio visibilidade, tropo difusão e satélite.
3G a 30G	S.H.F (Super High Frequency)	Micro-ondas	Comunicação pública a longa distância: sistemas interurbanos e internacionais em rádio visibilidade, tropo difusão e satélite.
30G a 300G	E.H.F (Extremely High Frequency)	Micro-ondas	Comunicação pública a longa distância: sistemas interurbanos e internacionais em rádio visibilidade, tropo difusão e satélite.

Na realização de um estudo para avaliar o efeito da atuação de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) na formação de dutos atmosféricos na região do aeroporto internacional de Petrolina-PE, Penaforte (2017), detectou uma forte relação entre inversões de subsidência e formações de dutos elevados. A queda brusca da umidade (secagem atmosférica) observada acima da base da camada de inversão representa o fator determinante para formação do duto.

Sousa et. al, (2016) investigaram a relação entre a estrutura da CLA (camada limite atmosférica) e a formação de DS (dutos de superfície) em casos extremos de precipitação na região de Petrolina-PE. Os resultados indicaram forte correlação entre os DS e o grau de instabilidade convectiva.

Penaforte et al. (2018) em um estudo sobre influência de condições meteorológicas locais na formação de dutos em Petrolina (PE) e natal (RN), concluíram que circulações locais têm influência considerável no perfil vertical da refratividade e no tipo de dutos atmosféricos. Os autores verificaram ainda uma relação direta entre a atuação da brisa marítima e a formação de dutos atmosféricos de superfície.

No desenvolvimento de um estudo sobre ocorrência de dutos de superfície (DS) no semiárido brasileiro, Chaves Filho et. al, (2013), verificaram que na ausência de atividade convectiva intensa, a influência das condições atmosféricas locais é preponderante na formação de DS.

Descontinuidades na cobertura vegetal e no teor de umidade no solo constituem fatores importantes na variabilidade de condições atmosféricas em escala local e podem causar distorções na propagação e variabilidade na intensidade de sinais radioelétricos.

Correia et. al, (2013), com base em simulações numéricas realizadas em alta resolução, com o modelo RAMS comprovaram que mudanças no uso da terra resultantes da substituição da vegetação nativa (caatinga) por culturas irrigadas têm impacto direto no padrão de refratividade atmosférica. Conforme ilustrado na Figura 1, os autores indicam o aumento substancial nos valores de Nu (termo úmido da refratividade) nas áreas dos perímetros públicos de irrigação (Bebedouro, Mandacaru, Nilo Coelho, Curaçá e Tourão) situados no Submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

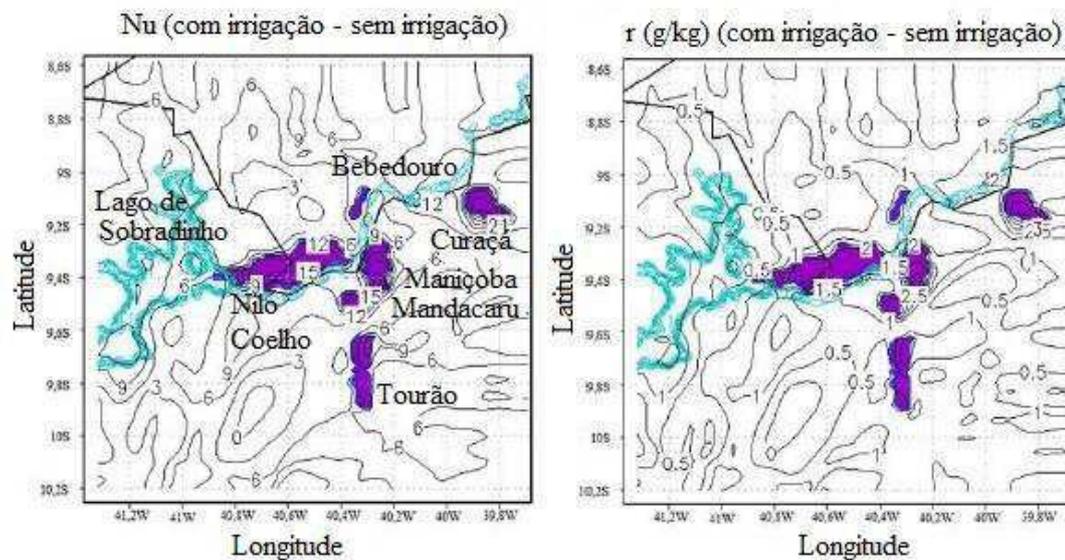


Figura 1. Distribuição espacial de Nu (u–refratividade) e r (g/kg) resultante da diferença entre as simulações “com irrigação” e “sem irrigação” no domínio da grade 2 (resolução: 2km) as 15 HL. As áreas coloridas representam o lago de Sobradinho, o rio São Francisco e os perímetros irrigados (Bebedouro, Nilo Coelho, Curaça, Maniçoba, Tourão e Mandacaru). Fonte: Modificado de Correia, et. al., (2013).

Os autores ressaltam que mudanças no uso da terra decorrentes da modificação da mata nativa (Caatinga) por culturas irrigadas representou um dos mecanismos determinantes na transferência de água para atmosfera. Esses resultados motivaram as investigações realizadas neste trabalho.

3.3. Sensoriamento Remoto como método de avaliação de mudanças na cobertura do solo

O sensoriamento remoto orbital óptico representa atualmente uma das ferramentas mais utilizadas na identificação e monitoramento de mudanças na superfície terrestre, seja resultante de fenômenos naturais ou de influências antrópicas. Bezerra et al., (2011) relatam que através do uso de técnicas do sensoriamento remoto é possível aprimorar o gerenciamento dos recursos naturais, tais como água, solo e vegetação.

O monitoramento é feito através da obtenção de parâmetros como saldo de radiação, albedo, emissividade e temperatura da superfície, radiação de ondas longas e índices de vegetação. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos mais

utilizados. Existem numerosos trabalhos que utilizam imagens de satélite para obtenção do NDVI em investigações sobre variações e mudanças climáticas.

Santos e Brito, (2007) comprovaram que o NDVI em áreas de Caatinga é mais dependente dos extremos de precipitação do que em regiões de Mata Atlântica. Concluíram que as mudanças climáticas detectadas pelo índice são resultantes tanto de fatores de grande escala como de escala local. Os autores também verificaram que o ENOS tem influência nos índices extremos de chuva e, conseqüentemente, sobre o clima e a dinâmica da vegetação do semiárido. Entretanto, uma das dificuldades na seleção das imagens de satélite é a presença de nuvens. Elas impedem que a energia emitida ou refletida pelos alvos da superfície terrestre chegue até o sensor a bordo do satélite (Lersch, 2003). Diversas limitações para o uso operacional do sensoriamento remoto e as estimativas das suas aplicações são limitadas por esses fatores.

Na faixa das micro-ondas o sensoriamento remoto tem sido amplamente usado em transferências e aquisição de dados, nas diferentes áreas da ciência. No entanto, a qualidade das transmissões pode ser bastante reduzida em regiões de agricultura intensiva ou em áreas litorâneas pelo aumento da descontinuidade na cobertura do solo e conseqüentemente na maior variabilidade das condições atmosféricas locais. A chuva, o vento e a concentração de vapor de água na baixa atmosfera estão entre os principais fatores responsáveis pela degradação do sinal em sistemas de transmissões sem fio (Correia, et al., 2013).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Características da Região de Estudo

Os municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA estão localizados no Submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco (Figura 2). Inseridos na região do semiárido brasileiro integram um dos maiores polos agroindustriais do país. Com a expansão urbana e das áreas agrícolas favorecidas pela instalação da usina hidrelétrica de Sobradinho no Vale do rio São Francisco, a região passou por grandes transformações no meio urbano e rural. Esse crescimento motivou a reestruturação do espaço agrário.

O surgimento de vários perímetros de irrigação no entorno da Usina Hidrelétrica de Sobradinho, alterou substancialmente o balanço de energia em superfície em virtude da

substituição da vegetação nativa (caatinga) por agricultura irrigada (Correia, 2001; Correia *et al.*, 2006; Penaforte, et., al., 2017). Essa mudança culminou com a expansão do agronegócio e crescimento econômico e social da região.

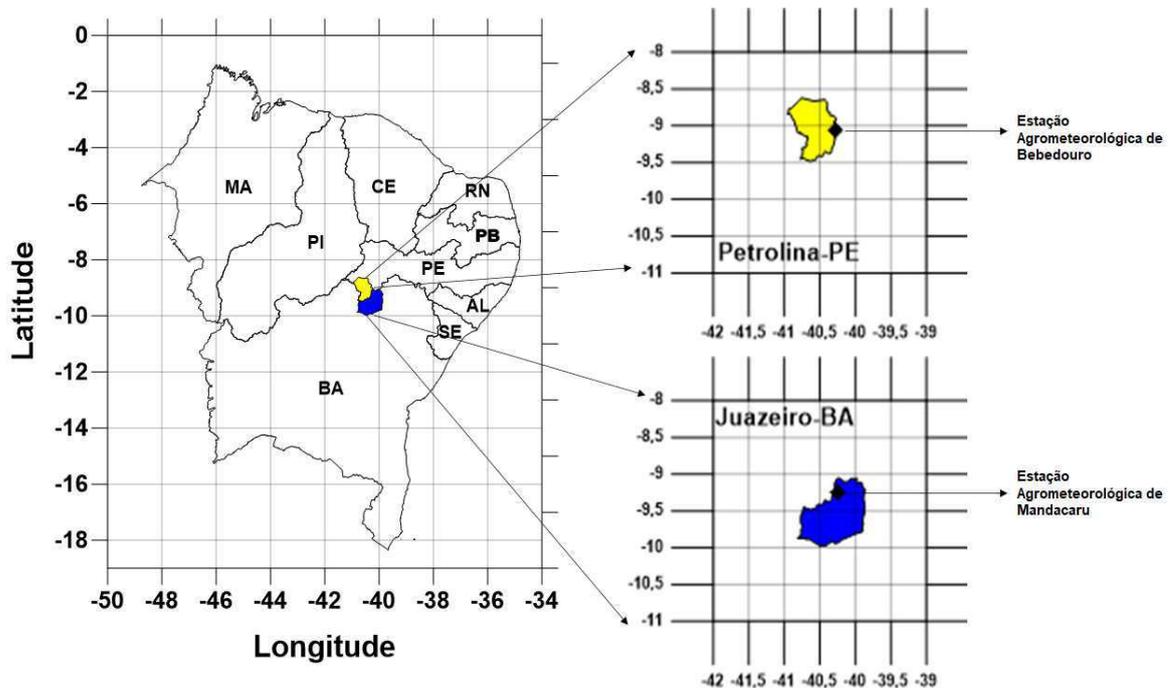


Figura 2. Localização geográfica para a região nordeste do Brasil, com destaque para as cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA. Fonte: autor

A principal característica econômica da agricultura irrigada, na região é a fruticultura voltada para a exportação da manga e da uva. Atualmente o polo de fruticultura irrigada Petrolina/Juazeiro representa um dos mais importantes centros econômicos do sertão pernambucano e baiano, com sua produção exportada em mais de 90 % para Europa, Estados Unidos e Japão (Araújo et. al 2013).

A Valexport (Associação dos Produtores Exportadores de Hortigranjeiros e Derivados do Vale do São Francisco) exerce papel de destaque na coordenação da cadeia produtiva das frutas da região. Atualmente aeroporto de Petrolina, tem pista com capacidade para operação de aviões cargueiros de grande porte. A companhia aérea Cargolux (Figura 3), passou a operar, em função da demanda por produtos cada vez mais valorizados no setor de exportação de frutas do Vale do São Francisco, com o Boeing 747-8F, terceiro maior cargueiro do mundo.

Petrolina aparece no ranking nacional entre os dez municípios de maior produção agrícola do país. Esse crescimento substancial na produção e exportação de uva e manga contribui para receita gerada pela agricultura do país (IBGE, 2007). O desenvolvimento da região semiárida reflete a identificação das oportunidades econômicas no processo produtivo, com a geração de empregos e aumento da renda familiar no processo produtivo (Silva et. al, 2010).



Figura 3. Avião Boeing 747-8F da empresa luxemburguesa Cargolux Airlines International SA (Cargolux). Fonte: Divulgação/Infraero.

4.2 Dados

Para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa foram utilizados:

- Dados diários de ar superior provenientes de sondagens atmosféricas realizadas em Petrolina-PE (09° 38'S – 40° 48'W; 370,0 m) às 12 UTC, disponíveis no site da Universidade de Wyoming – EUA (<<http://weather.uwyo.edu>>). Do mês de janeiro para o período de 2000 e 2014;
- Dados das normais climatológicas dos períodos: 1961–1990 e 1981-2010, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), obtidas de estações situadas na região Nordeste do Brasil, e dados coletados nas estações climatológicas de Bebedouro (PE) e Mandacaru (BA) do período de 1975 a 2015, pertencentes a CPATSA/EMBRAPA (Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) foram usados na

avaliação de mudanças no padrão da distribuição espacial da refração atmosférica em superfície;

- Dados mensais da estação meteorológica de Petrolina-PE pertencente ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia);
- Imagens do satélite Landsat-5 (TM), disponíveis no site do CPTEC (<<http://clima1.cptec.inpe.br/>>) foram utilizadas;
- Informações contidas nos Boletins CLIMANALISE e INFOCLIMA disponíveis no site do CPTEC (www.cptec.inpe.br).

4.3 Metodologia

Nesta seção será abordada a metodologia do trabalho, da forma adequada para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa.

4.3.1 Refração atmosférica e condições anômalas de propagação

A detecção de condições de propagação anômala (PA), no período analisado, foi feita com base na construção de perfis verticais do índice de refração modificado (M), obtido pela equação (1):

$$M = N + 0,157Z \quad (1)$$

Em que, N é a refratividade; e Z é a altura (m).

A relação entre as variáveis meteorológicas e a refratividade N é dada pela equação:

$$N = 10^6 * (n - 1) = N_s + N_u = \left(77,6 * \frac{P}{T}\right) + \left(3,73 * 10^5 * \frac{e}{T^2}\right) \quad (2)$$

Em que,

$N_s = \left(77,6 * \frac{P}{T}\right)$; é o termo seco da refratividade;

$N_u = \left(3,73 * 10^5 * \frac{e}{T^2}\right)$; é o termo úmido da refratividade;

P é a pressão atmosférica (mb);

T é a temperatura atmosférica (K);

Na avaliação da estratificação vertical do vapor foi necessário estimar o valor da razão de mistura r (g/kg). O cálculo foi feito a partir da equação (3).

$$r = 622 * \left(\frac{e}{P-e}\right) \quad (3)$$

Em que r é a razão de mistura em (g/kg), P é a pressão atmosférica em hPa e e é a pressão de vapor.

$$e = \frac{UR * e_s}{100} \quad (4)$$

Em que UR é a umidade relativa do ar (%) e e_s é a pressão de vapor de saturação.

$$e_s = 6,112 * EXP\left(\frac{17,67 * T}{T + 243,5}\right) \quad (5)$$

Quatro regimes de refração foram considerados nas análises:

1. Condições de Sub-refração: quando $dN/dZ > 0$: nestes casos, as ondas são desviadas para cima da trajetória original, diminuindo, assim, o alcance máximo da propagação;
2. Condições de Refração Normal: quando, $-79 < dN/dZ < 0$. Nesta situação, as ondas podem sofrer uma pequena mudança na direção inicial, acompanhando a curvatura da Terra e aumentando o alcance das ondas eletromagnéticas em relação ao horizonte geográfico;
3. Super-refração: este tipo de condição ocorre quando $-157 < dN/dZ < -79$. A curvatura da trajetória aumenta para baixo, ou seja, o feixe é desviado na direção da superfície terrestre;
4. Recepção (Dutos): condição atmosférica em que uma determinada camada pode aprisionar ondas radioelétricas em propagação. Ocorre quando $dN/dZ < -157$. Nestes casos, a super-refração é tão intensa que a onda eletromagnética fica oscilando dentro de uma mesma camada.

A Figura 4 representa um esquema de diferentes efeitos dos regimes de refração atmosférico na propagação das ondas eletromagnéticas. A ilustração refere-se a um cenário bastante comum de influência dos diferentes regimes da refração atmosférica com o uso do radar meteorológico, para o monitoramento de nuvens e precipitação.

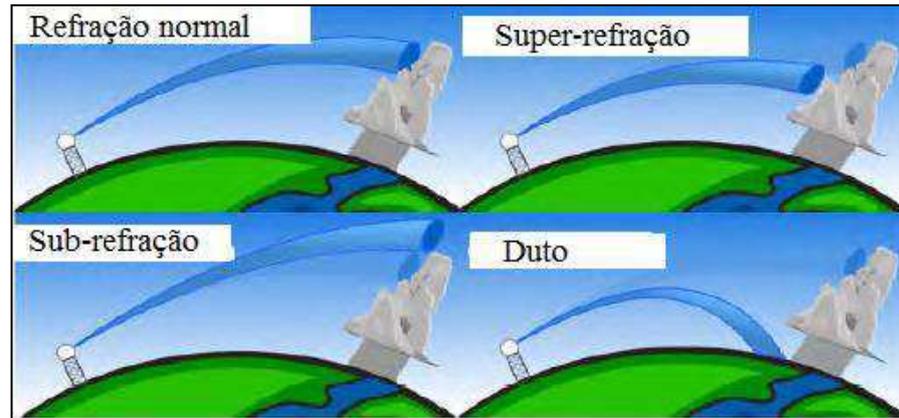


Figura 4. Condições de propagação do feixe de ondas do Radar Meteorológico. Adaptado de tutorial sobre radar do Serviço Meteorológico Nacional NOAA dos EUA, (<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/doppler/beam_max.htm>).

Propagações anômalas podem causar distorções, ruídos ou perdas de sinais em monitoramentos com radares meteorológicos. O conhecimento sobre a origem de possíveis interferências contribui para aprimorar o processamento e tratamento dos dados. Essas informações são fundamentais na interpretação e análises de produtos usados na previsão de tempo e no gerenciamento de recursos hídricos. Em situações de superefratção o feixe de ondas do radar é desviado para baixo e pode aumentar o valor da intensidade dos ecos de maneira anômala. Já no caso de sub-refração o feixe de ondas é desviado para cima e segue uma trajetória bem acima daquelas consideradas como padrão.

4.3.2. Variabilidade espacial e temporal da refratividade (N)

Mudanças na concentração de vapor na camada limite atmosférica (CLA), podem acarretar alterações na estratificação vertical da temperatura e umidade com influência marcante na trajetória das ondas radioelétricas. Neste contexto, pode-se deduzir que mudanças na cobertura e uso da terra podem impactar substancialmente o padrão de comportamento espacial e temporal da Refratividade (N). Neste trabalho enfoque especial foi dado a componente úmida da refratividade (Nu). Como é proporcional a pressão de vapor apresenta alta variabilidade em escala local. Simulações numéricas realizadas por Correia, et. Al, (2013) para avaliar o impacto de mudanças no uso da terra resultante da substituição da vegetação nativa (caatinga) por culturas irrigadas indicaram alta correlação entre o comportamento de N e Nu.

O método utilizado na primeira etapa desta avaliação consistiu na elaboração de mapas com distribuições espaciais de Nu em superfície para a toda região Nordeste. Inicialmente foram usados os dados das normais climatológicas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia. Numa segunda etapa as análises foram refeitas incluindo os dados das séries históricas de Bebedouro e Mandacaru.

4.3.3 O Box-Plot

O Box – Plot é um gráfico bastante utilizado na meteorologia para detecção de valores atípicos (outliers), que representam valores muito diferentes do restante do conjunto de dados. A importância desta investigação é separar aqueles valores que representam erros, que muitas vezes ocorrem no processo de coleta ou tratamento dos dados e precisam ser corrigidos ou retirados da amostra. No entanto, esses valores discrepantes podem ser medições corretas e nesse sentido, requer atenção especial no processo de análise já que podem indicar características de situações extremas e com impactos significativos para o estudo em questão.

A aplicação do *Box-Plot* (diagrama de caixa) permite analisar não apenas a dispersão e simetria dos dados e a existência de outliers, mas principalmente fazer comparações entre conjuntos dados. A mediana permite localizar o centro da distribuição dos dados. Em outras palavras, é o valor que divide ao meio, isto é, 50% dos elementos da amostra são iguais ou menores à mediana e 50% dos elementos são iguais ou maiores que a mediana (Figura 4). Os três quartis (Q1, Q2 e Q3) dividem os dados em 4 (quatro) subconjuntos, de forma que 25% dos dados se encontram abaixo de Q1, 25% entre Q1 e Q2, 25% entre Q2 e Q3 e 25% encontram acima de Q3.

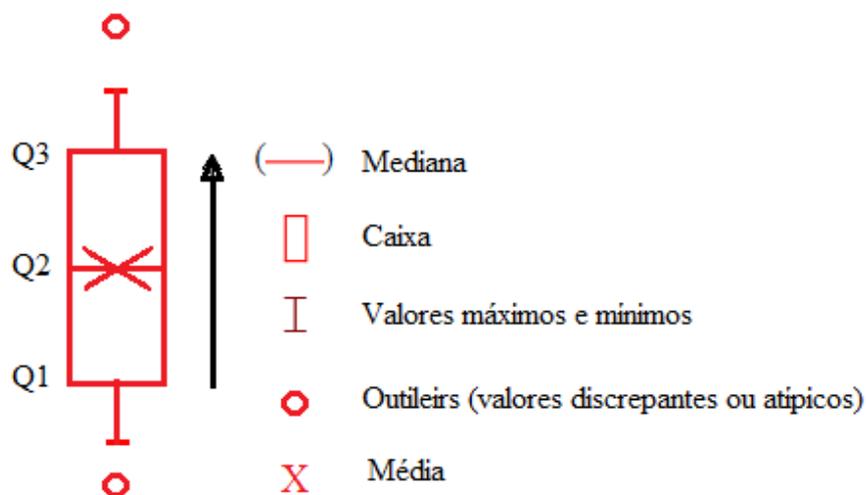


Figura 5. Representação teórica do blox-plot para um conjunto de dados.

4.3.4 Análise Estatística

No presente trabalho, o método de Regressão linear foi utilizado para analisar a influência da variação no teor de umidade na atmosfera sobre a variável Nu (termo úmido da refratividade atmosférica). O coeficiente de determinação R^2 e a análise de variância, ANOVA foram aplicados para verificar a diferença entre os grupos de dados testados, verificando p-valor significativo quando $\leq 0,05$.

4.3.5 Análise de variância com fator único (ANOVA)

A análise de variância com fator único (ANOVA) é um teste estatístico muito utilizado na meteorologia. Além de permitir verificar se existem diferenças significativas entre as médias possibilita detectar se alguns dos fatores analisados exercem mudanças em algumas das variáveis dependentes. Neste contexto, a aplicação desta técnica foi utilizada para verificar se existem diferenças significativas entre as médias dos dados coletados antes e depois da expansão agrícola em áreas de Caatinga, a fim de verificar a influência dessas áreas na componente úmida de refratividade (Nu). O teste mostrou-se satisfatório em pesquisas semelhantes (CORREIA, 2001; CORREIA et. al., 2006, NOGUEIRA 2015).

Utilizaram-se as seguintes hipóteses para aplicação do teste ANOVA:

$$H_0: M_2 - M_1 = 0$$

$$H_1: M_2 - M_1 > 0 \text{ ou } M_2 - M_1 < 0 \quad (6)$$

Na qual M_1 e M_2 são dados médios do antes e depois da expansão agrícola em áreas de Caatinga respectivamente. Aplicação do teste na série de valores mensais foi de forma unilateral para a esquerda ou direita, dependendo da situação, com nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

A utilização da análise de variância fator único (ANOVA) foi aplicada para determinar as mudanças ocorridas no uso do solo (implantação da atividade agrícola), a fim de entender o quanto o crescimento dessas áreas contribuiu para modificar a componente úmida de refratividade (Nu) na área de estudo. Considerando que o principal objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da expansão agrícola no padrão espacial do índice de refração atmosférica, foi dividido a série ao meio entre 1975-1994 e 1995-2014 contabilizando 20 anos de dados. Representando o período de 1975-1994 como sendo classificada como fator “antes” da

expansão agrícola, e 1995-2014 o “depois” da expansão, sendo o critério utilizado para a divisão dos dados do período “antes” e “depois” da expansão com base nas informações obtidas através do box-plot. Os dados utilizados para aplicação desta análise de variância devem conter amostras independentes, originárias de populações normais com igual variância.

$$H_0: \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \bar{X}_3 = \bar{X}_m \text{ ou} \quad (7)$$

H_0 sendo verdadeira pressupõe que cada grupo o fator determinante representa uma mesma população e que cada grupo apresentará a mesma média. Existindo assim duas fontes de variabilidade:

- (1) Uma fonte resultante da real diferença entre as populações, denominada como “variabilidade entre”. Neste contexto, quanto maior a variabilidade mais verdadeira é a evidência de diferenças entre as populações de onde as amostras de dados foram coletadas;
- (2) Uma fonte resultante das diferenças dentro de cada amostra geralmente é denominada como “variabilidade dentro”. Neste contexto quanto maior a variabilidade mais complexa é para determinar se as populações são diversas ou não.

As estimativas de variância são combinadas com o único propósito de testar H_0 . No entanto, esta comparação não pode ser feita diretamente devido a um número maior de ocorrência, isto é, os níveis de autonomia diferem uma da outra (os tamanhos das amostras são diferentes). Uma alternativa é usar o teste-F de Snedecor, que produz uma razão dada por:

$$F = \frac{\text{Variância entre}}{\text{Variância dentro}} = \frac{MQE}{MQD} \quad (8)$$

Este valor poderia ser relacionado com o F crítico (tabelado) para um determinado nível de significância.

Na qual:

$$MQE = \frac{SQD}{m(n-1)} \text{ e } MQD = \frac{SQE}{(m-1)} \quad (9)$$

Em que: SQD (soma dos quadrados dentro dos grupos), SQE (soma dos quadrados entre grupos), m é o número de amostras e n é o número de observações.

$$SQE = n \sum_{i=1}^m \bar{X}_t^2 - nm \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{x_{ij}}{mn} \right)^2 \quad (10)$$

$$SQD = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij}^2 - nm \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{x_{ij}}{mn} \right)^2 - SQE \quad (11)$$

$$\bar{X}_t = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{j=1}^n X_{ij}, i=1, 2, \dots, m \text{ (a média do } i\text{-ésimo grupo ou amostra)} \quad (12)$$

4.3.6 Sensoriamento remoto

Estimativas do NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada), foram realizadas a partir de imagens do satélite Landsat-5 com o objetivo de avaliar mudanças na cobertura do solo na região de Petrolina (PE).

As imagens do satélite Landsat-5, disponíveis no catálogo de imagens da Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foram obtidas para os meses de janeiro de 2007 e dezembro de 1993. A dificuldade de encontrar as imagens é devido à presença de nuvens na área (por se tratar do período chuvoso para a região) e ruídos (falhas no sensor do satélite) nas imagens, essas foram as únicas imagens que foram encontradas do satélite Landsat-5 para o período de análise do estudo, com a finalidade de atender o objetivo proposto do trabalho. Composta de sete bandas, as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 possuem resolução geométrica de 30 metros e a banda 6 com resolução de 120 metros, a área de abrangência de uma imagem do Landsat-5 é de 185 x 185 Km. As principais características do Landsat -5 são descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição das características do satélite Landsat-5 (Fonte: INPE).

Instrumento/Sensor	MSS (até Ago/1995) e TM
Operadora/Instituição	NASA (National Aeronautics and Space Administration)
Responsável	Administration)
País	Estados Unidos
Situação Atual	Inativo (22/11/2011)
Lançamento	01/03/1984
Altitude	705 km
Inclinação	98,20°
Órbita	Quase-Polar, Heliossíncrona
Faixa Imageada	185 Km
Tempo de Duração da Órbita	98,20 min
Horário da Passagem	09h / 11h
Período de Revisita	16 dias
Resolução Espacial	MSS: 80 m TM: 30 m

As imagens foram obtidas por meio de técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens utilizando-se o software QGIS versão 2.18 Las Palmas disponível gratuitamente no site da QGIS Brasil (<<http://qgisbrasil.org>>). No processamento das imagens foram obtidos recortes da área de estudo, aplicados os devidos ajustes de empilhamento para cada banda do satélite, calibrações radiométricas e reflectância das imagens.

4.3.6.1 Calibração Radiométrica

A calibração radiométrica é a conversão do número digital (ND) de cada pixel da imagem da banda a ser processada em radiação espectral monocromática, estas radiâncias por contrapartida é a representação da radiação solar refletida por cada pixel da imagem, permitindo encontrar a primeira componente do saldo de radiação da superfície (R_n). Na obtenção da radiância de cada pixel da banda foi utilizada equação (13) proposta por (Markham e Baker, 1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \left(\frac{b_i - a_i}{255} * ND \right) \quad (13)$$

Em que, a_i e b_i correspondem as radiâncias espectrais máximas e mínimas ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$), ND é a intensidade do pixel (valor que varia entre 0 e 255) e i é a correspondente das bandas (1 à 7) do satélite Landsat-5, composta por sete bandas espectrais cuja suas características estão na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do Landsat-5, com os correspondentes intervalos de comprimentos de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiância solar espectral no topo da atmosfera (K_{λ_i}).

Descrição das bandas	Comprimento de onda (μm)	Coeficientes de calibração ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}\mu\text{m}^{-1}$)		K I ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
		a	b	
Banda 1 (Azul)	0,45 – 0,52	-1,765	178,941	1957
Banda 2 (Verde)	0,52 – 0,60	-3,576	379,055	1829
Banda 3 (Vermelho)	0,63 – 0,69	-1,502	255,695	1557
Banda 4 (IV próximo)	0,76 – 0,90	-1,763	242,303	1047
Banda 5 (IV médio)	1,55 – 1,75	-0,411	30,178	219,3
Banda 6 (IV termal)	10,4 – 12,5	1,238	15,600	–
Banda 7 (IV médio)	2,08 – 2,35	-0,137	13,156	74,52

*IV – Infravermelho

4.3.6.2 Reflectância

A reflectância de cada banda (L_{λ_i}) é definida pela razão entre o fluxo de radiação solar refletido através da superfície e o fluxo de radiação solar global incidente, que é dada pela equação (14) (Allen et al., 2002; Silva et al., 2005):

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi * L_{\lambda_i}}{k_{\lambda_i} * \cos Z * d_r} \quad (14)$$

L_{λ_i} é a radiância espectral para cada banda, k_{λ_i} é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$), Z é o ângulo zenital solar e d_r é quadrado da relação entre a distância média Terra-Sol (r_0) e a distância Terra-Sol (r) em determinado dia do ano, dada por (15) (Iqbal, 1983):

$$\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = 1,00011 + 0,034221\cos\Gamma + 0,00128\text{sen}\Gamma + 0,000719\cos 2\Gamma + 0,000077\text{sen} 2\Gamma \quad (15)$$

Na qual, $\Gamma = 2\pi(D - 1)/365$ (radianos), D é a ordem do dia do ano.

4.3.7 Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI)

Segundo Franco et al (2011), o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) é um indicador da quantidade e da condição (vigor) da vegetação. Neste trabalho as estimativas do NDVI também foram usadas com o objetivo de avaliar o grau de mudanças na cobertura do solo na área de estudo.

O cálculo do NDVI é obtido pela razão entre a diferença da refletividade do infravermelho próximo (ρ_{iv}) e do vermelho (ρ_v) e soma entre elas (Tucker (1979), Tasumi (2003)):

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \quad (16)$$

ρ_{iv} e ρ_v , respectivamente representa às bandas 4 e 3 do Landsata-5 (TM), a banda 4 (infravermelho próximo) com medidas do comprimento de onda na ordem de 0,76 – 0,79 μm e a banda 3 (vermelho) possui comprimento de onda 0,63 – 0,69 μm .

A variação do NDVI é entre -1 a 1, para superfícies com vegetação verde os valores variam entre 0 e 1. Em relação a água e nuvens ou solos expostos os valores geralmente são menores que zero. Quanto maior o valor positivo do NDVI maior a presença de vegetação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Aspectos Climatológicos da Região de Estudo

A evolução temporal da média mensal da precipitação obtida com base na série histórica de dados coletados nas estações de Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE, no período de 1975 a 2014, é apresentada na Figura 6. Observa-se um ciclo sazonal bem definido na região com o período chuvoso concentrado entre os meses de novembro e abril e o período de estiagem no período de maio a outubro. Verifica-se que em média, os valores da precipitação obtidos na estação de Mandacaru são um pouco superiores aos das demais estações nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março.

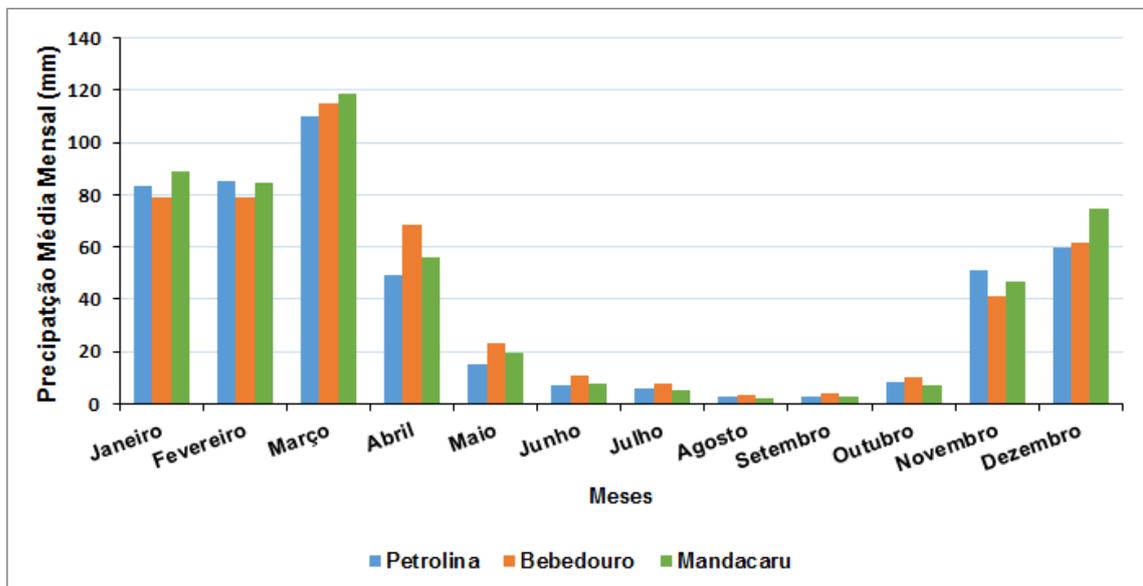


Figura 6. Médias mensais da precipitação em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE obtida no período de 1975-2014. Fonte de dados: Embrapa Semiárido e INMET.

Na Figura 7 são apresentadas as médias mensais climatológicas da umidade relativa do ar para Petrolina-PE, Bebedouro-PE e Mandacaru-BA no período de 1975 a 2014. Nota-se um padrão sazonal bem definido com valores mais altos da umidade relativa no período chuvoso e valores mais baixos no período de estiagem nas três localidades. Verifica-se que ao contrário do comportamento observado na precipitação mensal, os valores de umidade são visivelmente mais altos em Bebedouro. Valores mais baixos em Petrolina indicam o efeito da urbanização.

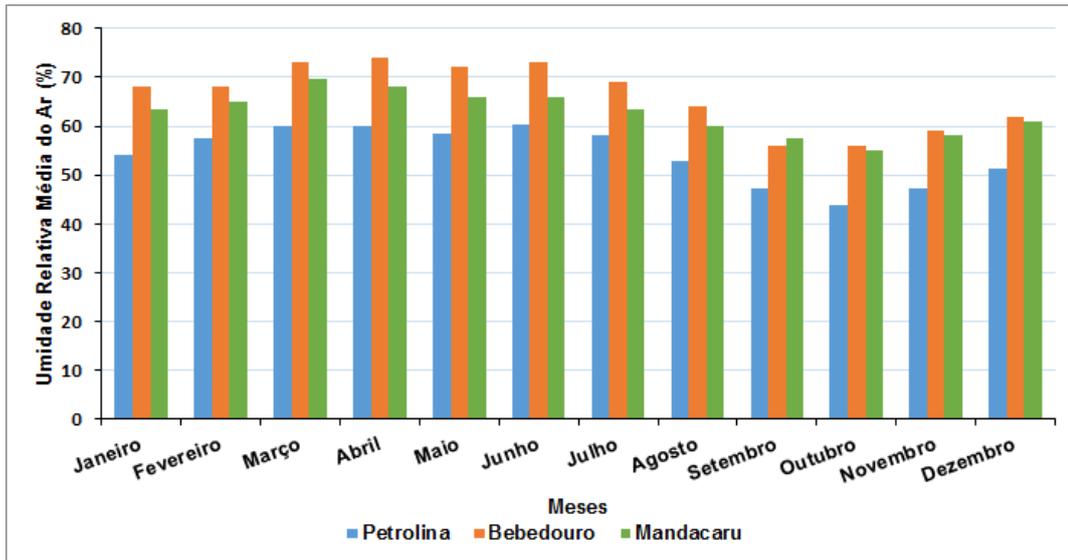


Figura 7. Médias mensais da umidade relativa do ar em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE obtida no período de 1975-2014. Fonte de dados: Embrapa Semiárido e INMET.

A evolução temporal das médias mensais climatológicas da componente úmida da refratividade (N_u) é apresentada na Figura 8. É possível constatar que essa variável tem comportamento semelhante ao da umidade relativa nas três localidades analisadas. Valores mais altos de N_u são observados em Bebedouro-PE e Mandacaru-BA quando comparados com os valores de Petrolina-PE.

Dois fatores devem ser considerados na interpretação desse resultado, uma vez que um dos objetivos da pesquisa é caracterizar a influência de mudanças antrópicas decorrentes da expansão agrícola na área de caatinga. Um deles é a diferença nas características da cobertura do solo. Em escala local, descontinuidades na cobertura do solo geram gradientes horizontais de temperatura e circulações termicamente induzidas do tipo brisa. Quanto maior for a descontinuidade na cobertura da terra, maior o gradiente de temperatura e mais intensas são as circulações locais (Mahfouf et al., 1987). Consequentemente, mudanças no padrão de vento local tem influência no transporte horizontal e vertical de vapor d'água. Outro fator igualmente importante que explica a variação temporal e espacial da umidade do ar é a troca de água e energia entre a superfície e a atmosfera através dos fluxos turbulentos de calor latente e sensível (Correia, et. al., 2006; Cabral et. al., 2019).

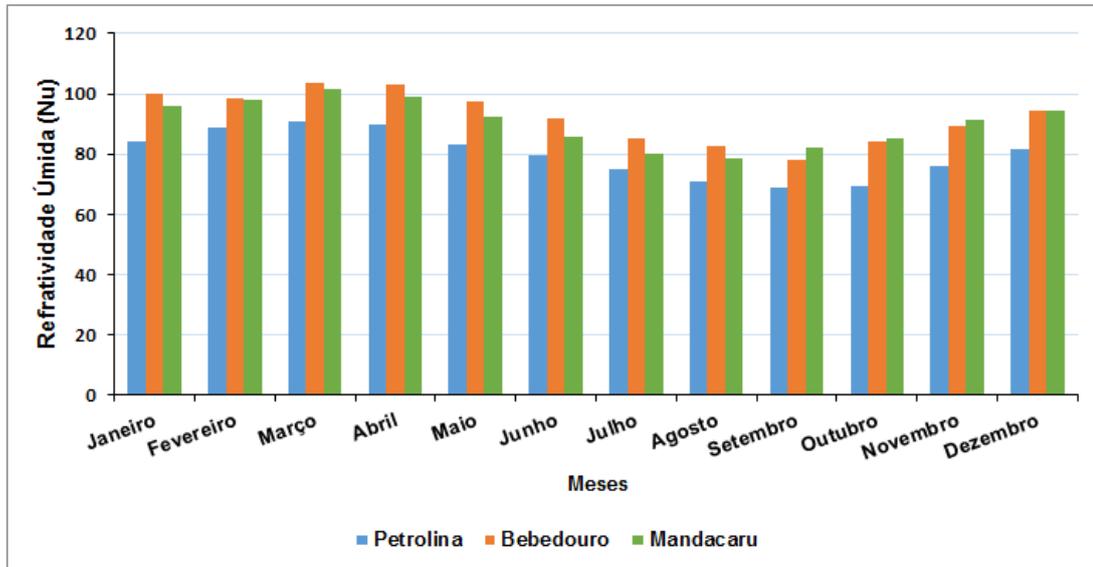


Figura 8. Médias mensais da componente úmida da Refratividade em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE obtida no período de 1975-2014. Fonte de dados: Embrapa Semiárido e INMET.

5.2 Sensoriamento Remoto

Nesta seção, é feita uma avaliação da expansão da agricultura irrigada no bioma caatinga na região do polo agroindustrial, Petrolina-Juazeiro. A análise foi feita através da estimativa do parâmetro NDVI com técnicas de sensoriamento remoto. Para isso, foram selecionadas duas imagens de satélite obtidas no ano de 1993 (17 de dezembro de 1993) e no ano de 2007 (22 de janeiro de 2007). As imagens foram escolhidas na pré-estação chuvosa considerando dois aspectos fundamentais da pesquisa: dias com pouca nebulosidade e características favoráveis ao desenvolvimento de dutos atmosféricos de superfície.

Valores do NDVI estimados a partir das imagens de 17/12/1993 e 22/01/2007 são apresentadas nas Figuras 9 e 10. Observa-se claramente que houve um aumento na área coberta com vegetação de Bebedouro (PE) e Mandacaru (BA).

Os resultados obtidos coincidem com valores encontrados na literatura para os corpos de água, vegetação nativa (Caatinga), culturas irrigadas e solo nu. O NDVI em 1993 (Figura 9) variou entre -0,175 e 0,63, para o ano de 2007 (Figura 10) variou entre -0,505 e 0,666. Os valores negativos encontrados correspondem a corpos de água (principalmente na área do lago de Sobradinho e no rio São Francisco) e solos descobertos. Valores positivos foram encontrados nas áreas de vegetação, com máximos nos perímetros irrigados (Figuras 9 e 10).

É possível verificar um aumento da área vegetada entre 1993 e 2007 tanto na região de Bebedouro (Fig. 9.a e Fig. 10.a) quanto na região onde está localizada a estação de Mandacaru (Fig. 9.b e Fig. 10.b). No entanto, o aumento foi bem mais expressivo na área de Mandacaru-BA. Esses resultados validam as conclusões que serão descritas na seção de análises estatísticas, obtidas através da análise dos *Box-plot*.

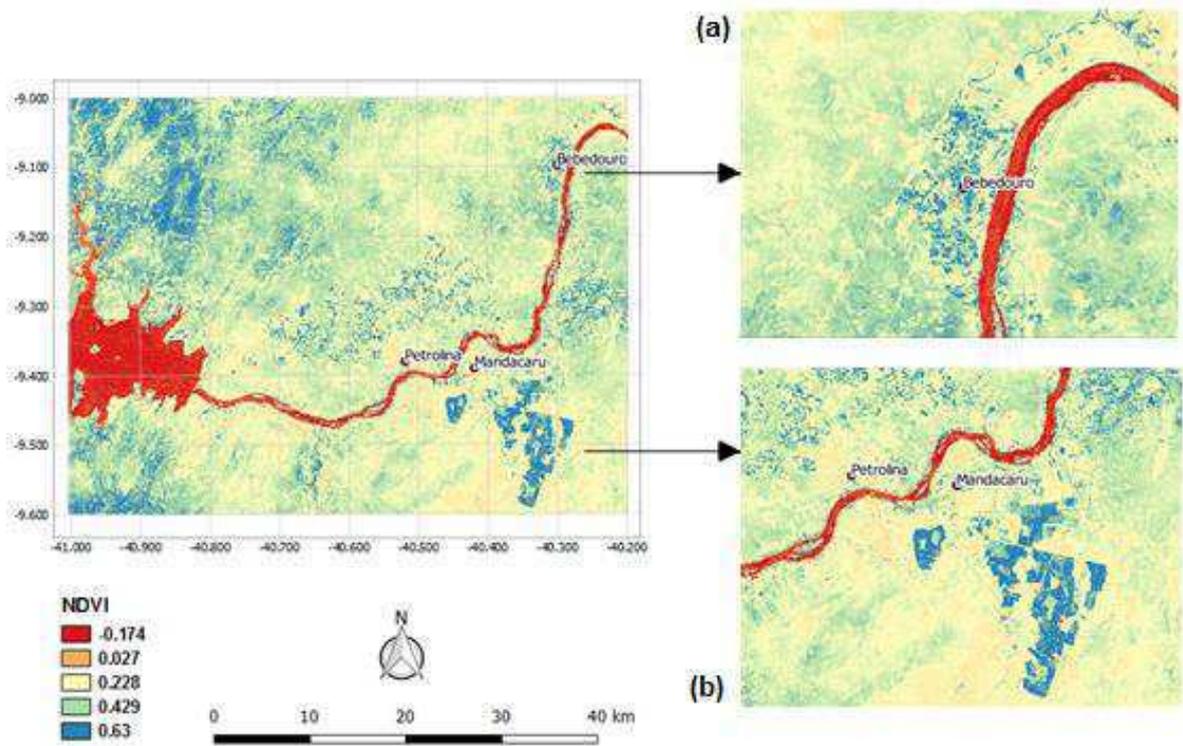


Figura 9. Distribuição espacial do NDVI no dia 17 de dezembro de 1993, com foco em áreas de agricultura irrigadas (a) Bebedouro e (b) Mandacaru.

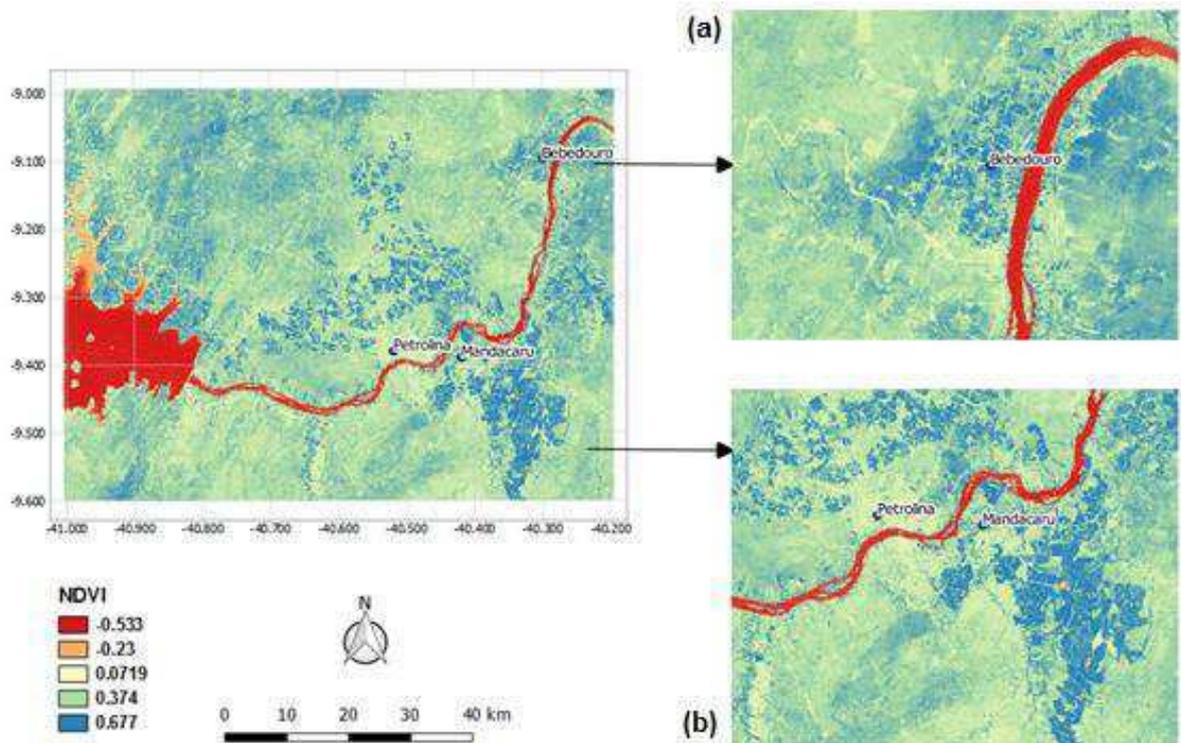


Figura 10. Distribuição espacial do NDVI no dia 22 de janeiro de 2007, com foco nas áreas de agricultura irrigadas (a) Bebedouro e (b) Mandacaru.

5.3 Análises Estatísticas

Os gráficos *Box-plot* apresentados na Figura 11, mostram a variação da componente úmida média mensal da refratividade (N_u) ao longo dos anos, para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina no período de 1975 a 2014. O uso desse tipo de gráfico é relevante nesse estudo, já que permite visualizar simultaneamente aspectos importantes da distribuição dos dados, incluindo medidas de dispersão bem como valores discrepantes. O objetivo de verificar a distribuição dos dados de um *box-plot* é encontrar o centro dos dados representados pela média (X), mediana ($-$), a amplitude dos dados máxima e mínima ($|--|$) e os outliers ($^{\circ}$) que representa valores atípicos ou erros nos dados.

Uma característica marcante observada em Mandacaru (Fig. 11.b), é o aumento substancial nos valores de N_u , no período entre os anos de 1995 e 2012, não detectada na análise dos dados de Bebedouro (PE) e de Petrolina (PE).

Os valores mais baixos de N_u , registrados em Mandacaru (BA), são observados no ano de 1999. Também em 1999 nota-se uma maior dispersão nos dados (maior amplitude da caixa) em Bebedouro e Mandacaru. Já no *box-plot* de 2001 tem-se um comportamento inverso, percebe-se menor dispersão dos dados nas três localidades. Outliers (valores atípicos)

foram detectados apenas nos anos de 1991 em Petrolina, 1992 em Bebedouro e 1995, em Mandacaru.

Esse padrão de comportamento detectado em Mandacaru está de acordo com resultados obtidos por Araújo e Silva, (2013) em estudo sobre a influência do polo frutícola Petrolina/Juazeiro na economia da região. Os autores ressaltam que em decorrência de grandes investimentos na agricultura irrigada na década de 1990 a produção da manga e da uva em 1995 já era superior à dos anos 1980 (época de crescimento vertiginoso em toda produção no Vale do rio São Francisco). Existe uma relação positiva entre teor de vapor na atmosfera, Nu e processos de evapotranspiração.

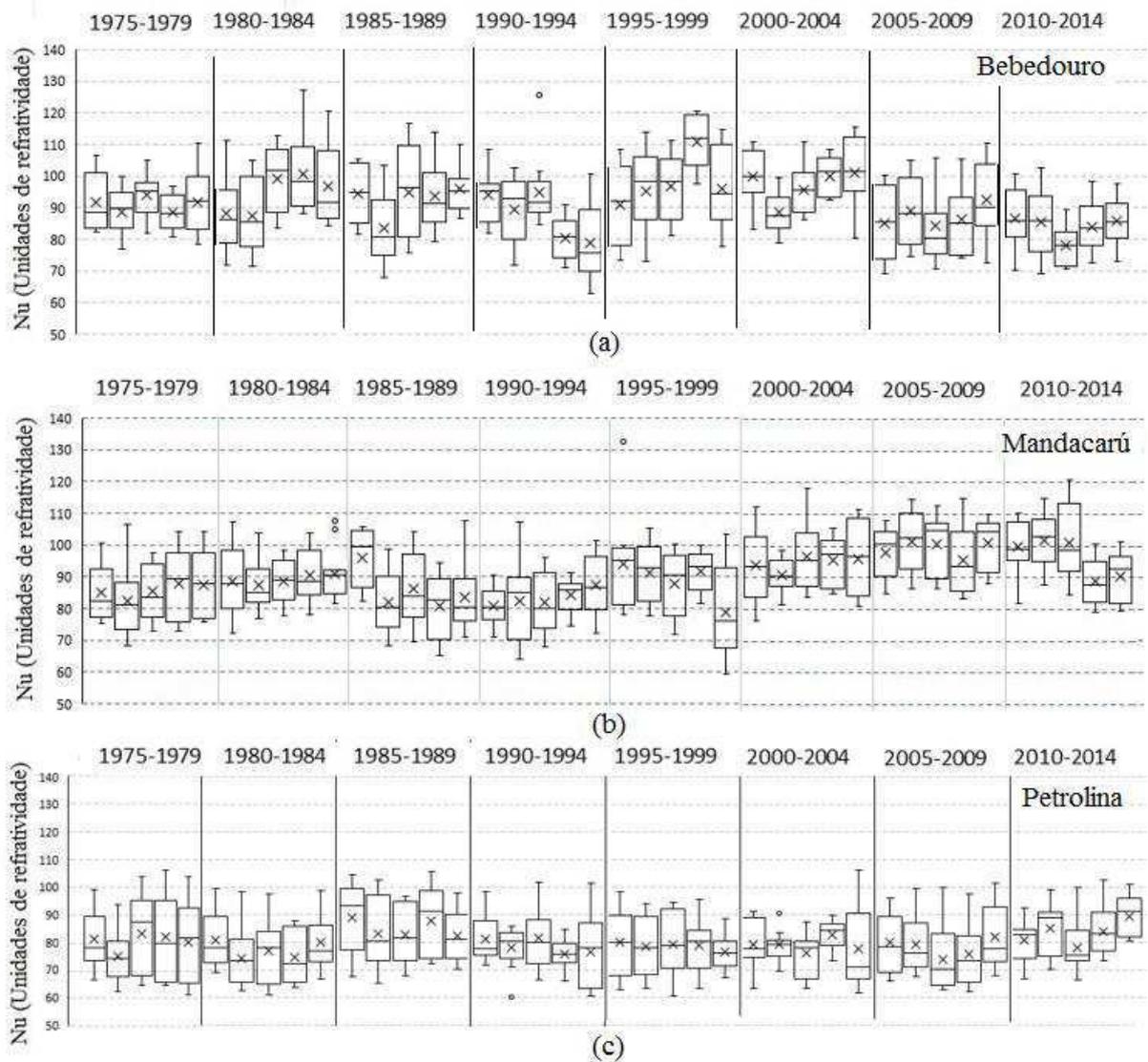


Figura 11. Variabilidade da distribuição da refratividade (Nu) para (a) Bebedouro, (b) Mandacaru e (c) Petrolina no período de 1975 a 2014. Fonte de dados: Embrapa Semiárido e INMET.

Conforme dados do Censo agropecuário do IBGE (2006) e da Ana (2017), a área irrigada no Brasil tem crescido a taxas superiores a 4% ao ano desde a década de 1960. Como pode ser visto na Tabela 3, nota-se um crescimento expressivo da irrigação no Estado da Bahia, especificamente a partir de meados da década de 1990, quando comparado com as demais localidades da Região Nordeste.

Tabela 3. Área equipada para Irrigação na Região Nordeste. Fonte: Modificado de ANA (2017).

Região / UF	1960	1970	1975	1980	1985	1996	2006	2015
NORDESTE	51.770	115.971	163.358	261.425	366.832	751.886	1.007.657	1.171.159
AL	5.610	13.218	18.643	12.410	27.814	156.992	195.764	185.717
BA	22.102	27.042	41.007	70.603	107.055	209.705	312.668	504.781
CE	11.389	25.484	29.887	63.599	67.305	108.998	117.381	70.449
MA	74	1.820	524	2.037	24.035	16.521	64.059	84.575
PB	3.439	13.433	18.227	18.085	18.895	63.548	58.683	59.357
PE	6.265	19.002	34.553	65.039	83.457	118.400	152.917	146.169
PI	451	1.863	1.944	6.387	13.560	18.254	30.948	32.266
RN	1.383	5.471	7.896	15.418	17.589	45.778	54.716	57.999
SE	1.057	8.639	10.678	7.846	7.122	13.691	20.521	29.845

Resultados semelhantes foram obtidos por Silva Paz, et. al.; (2003). Os autores utilizando dados provenientes da Secretaria do Estado da Bahia, demonstraram que na década de 1990 a agricultura irrigada no Estado da Bahia teve um crescimento explosivo conforme ilustração apresentada na Figura 12. Processos de evapotranspiração estão entre os principais mecanismos de transferência de vapor para atmosfera. Portanto, a tendência de aumento observada nos valores de Nu a partir de meados da década de 90 na série de dados de Mandacaru (BA) pode ser considerado um dos fatores indicativos dos efeitos da expansão da agricultura irrigada na região.

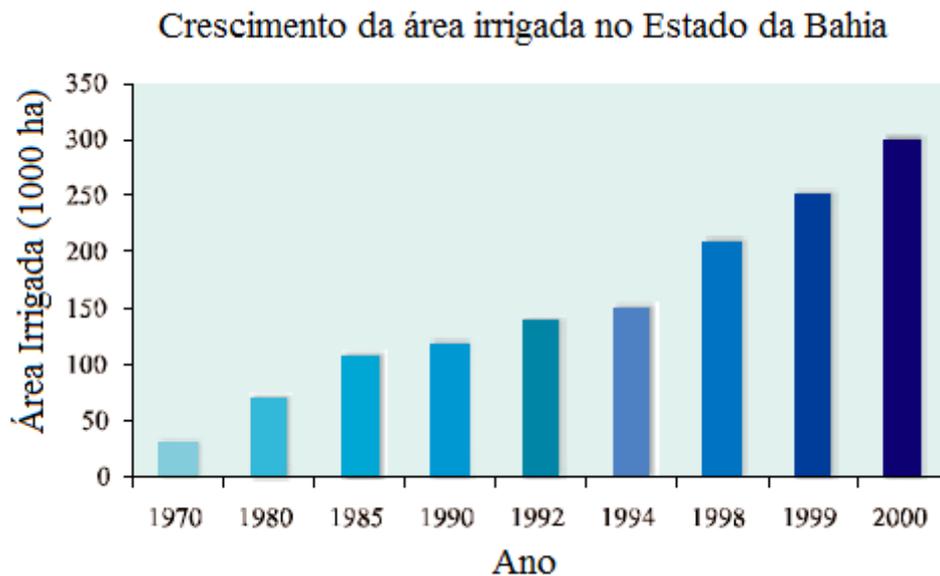


Figura 12. Evolução temporal da área irrigada no Estado da Bahia. Fonte: Silva Paz, et. al., (2003).

5.4 Redução de Efeitos Causados por outros fatores

Nesta seção é apresentada uma discussão dos resultados obtidos através da aplicação de testes de hipóteses que permitiram identificar e avaliar o grau das alterações na umidade atmosférica (r (g/kg)) e no termo úmido da refratividade atmosférica (Nu) em função da expansão agrícola na região do polo agrícola Juazeiro-Petrolina. O método consiste em uma análise estatística feita através da comparação de dados coletados em estações sob a influência de perímetros irrigados situados próximos da represa de Sobradinho no Submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Com esse propósito, o método de análise de variância (ANOVA) com fator único foi aplicado tendo como critério determinante um período de mudanças ambientais em meados da década de 1990, no semiárido nordestino, pelo crescimento acelerado no setor da agricultura irrigada. Na utilização da técnica estatística, o ano de 1995 foi usado como limite para divisão da série em dois grupos denominados antes e depois da expansão agrícola. A escolha do ano foi feita a partir das informações extraídas dos gráficos *Box-Plot* para Mandacaru (BA) (Fig. 11.) e respaldadas por dados do IBGE e da ANA conforme mencionado anteriormente. Para afirmar que as médias desses grupos são diferentes é necessário que essas amostras sejam independentes.

De acordo com resultados obtidos por Correia, et. al., (2006), em um estudo sobre o impacto da represa de Sobradinho no Médio e Submédio da bacia hidrográfica do São Francisco, as variáveis meteorológicas são funções do tempo e do espaço. Os dados utilizados nessa pesquisa provêm de estações situadas em localidades relativamente próximas e no entorno do lago de Sobradinho. Para decidir se as médias dos grupos analisados (1975-1994 e 1995-2014) são diferentes é necessário que essas amostras sejam independentes.

Na interpretação dos resultados podem, portanto, surgir dúvidas em relação às causas da variação dos parâmetros, já que as diferenças observadas podem ter sido produzidas, tanto pela influência isolada de fatores locais, quanto por fatores meteorológicos de escala maior. Neste sentido é importante usar algum método que permita filtrar ou minimizar o efeito de fatores responsáveis por alterações simultâneas nas três localidades (no mesmo período). Com esse objetivo decidiu-se efetuar duas análises: utilizando inicialmente os dois grupos (antes e depois da expansão agrícola) sem intervenção na série de dados e numa segunda etapa, aplicar a técnica em novas séries de dados formadas pela diferença entre os dados das 3 localidades (Petrolina, Bebedouro e Mandacaru). Entende-se que a diferença entre as séries minimiza os efeitos da grande escala. Método semelhante foi usado por Grimm (1988) em um estudo sobre as variações climáticas na área do Lago de Itaipu e Correia, et. al., (2006) em um estudo sobre geração de microclima na região da Hidrelétrica de Sobradinho.

5.5 Razão de Mistura

Nas Tabelas 4, 5 e 6 são apresentados os resultados obtidos com a análise de variância aplicada à razão de mistura, aplicada as séries de Petrolina-PE, Bebedouro-PE e Mandacaru-BA, com nível de significância de 95%. Os valores contidos na coluna “Valor-P” representam o maior valor do nível de significância para o qual H_0 é rejeitada. Portanto, sempre que o “Valor-P” for menor que o α adotado (0,05), H_0 deve ser rejeitada. Esse valor permite também avaliar o grau de significância das decisões.

Na análise de variância normalmente se supõe que a média dos quadrados “entre” sejam iguais ou maiores em relação à média dos quadrados “dentro” (fontes de variação). Para Petrolina-PE (tabela 4) a análise para os dados da razão de mistura, mostra que a hipótese nula não deve ser rejeitada para os meses de fevereiro, março, abril e novembro. Nota-se que valores da média dos quadrados “entre” são menores quando comparados com a média dos valores “dentro”. Uma possível explicação para este resultado é a influência de outras fontes

de variação nos dados tais como as circulações do tipo brisas (escala local) ou pela atuação de sistemas meteorológicos de grande escala.

Na tabela 5 são apresentados os resultados das análises para Bebedouro-PE. Verifica-se que semelhante ao caso anterior, a hipótese nula não pode ser rejeitada. com relação à média dos quadrados o mês de maio é o único mês em que o valor “dentro” da fonte de variação fica abaixo da variação “entre”.

A tabela 6 corresponde ANOVA aos resultados obtidos com a análise de variância aplicada a razão de mistura para Mandacaru-BA. Verifica-se que a hipótese nula deve ser rejeitada em quase todos os meses, exceto para o mês de junho. A rejeição da hipótese nula significa que existe uma diferença real entre as médias dos dois grupos (1975-1994 e 1995-2014) para Mandacaru-BA. Esse resultado indica que a expansão agrícola alterou a umidade local. Outra conclusão importante dessa análise para Mandacaru é que essa mudança pode ser considerada como significativa do ponto de vista estatístico já que o valor P é menor que 0,05 para todos os meses com exceção apenas para o mês de junho.

Tabela 4. Resultados da análise de variância aplicada à razão de mistura para série de Petrolina-PE, com $\alpha = 0,05$, para razão de mistura. $F_{crítico} = 4,0981$. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$

Mês	Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	gl	Média dos Quadrados	Fobs	Valor-P
Janeiro	entre	0,184939	1	0,184939	0,077828	0,781776
	dentro	90,29779	38	2,376258		
Fevereiro	entre	2,319295	1	2,319295	1,414198	0,241739
	dentro	62,32026	38	1,640007		
Março	entre	3,989111	1	3,989111	2,717241	0,107514
	dentro	55,78681	38	1,468074		
Abril	entre	1,949988	1	1,949988	1,128082	0,294889
	dentro	65,68633	38	1,728588		
Mai	entre	0,015433	1	0,015433	0,013106	0,90946
	dentro	44,74893	38	1,177603		
Junho	entre	0,285321	1	0,285321	0,395835	0,533012
	dentro	27,39064	38	0,720806		
Julho	entre	0,464261	1	0,464261	0,673836	0,416837
	dentro	26,1813	38	0,688982		
Agosto	entre	0,061181	1	0,061181	0,09287	0,762223
	dentro	25,03381	38	0,658784		
Setembro	entre	0,024033	1	0,024033	0,031835	0,859339
	dentro	28,68798	38	0,754947		
Outubro	entre	0,133188	1	0,133188	0,128403	0,722077
	dentro	39,41623	38	1,037269		
Novembro	entre	2,226575	1	2,226575	1,434219	0,238494
	dentro	58,99366	38	1,552465		
Dezembro	entre	1,00946	1	1,00946	0,407882	0,526877
	dentro	94,0455	38	2,474882		

Tabela 5. Resultados da análise de variância aplicada à razão de mistura para série de Bebedouro-PE, com $\alpha = 0,05$, para razão de mistura. $F_{crítico} = 4,0981$. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$

Mês	Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	gl	Média dos Quadrados	Fobs	Valor-P
Janeiro	entre	0,284448	1	0,284448	0,073453	0,787841
	dentro	147,1559	38	3,872524		
Fevereiro	entre	0,064432	1	0,064432	0,031707	0,859619
	dentro	77,22079	38	2,032126		
Março	entre	0,009085	1	0,009085	0,004808	0,945083
	dentro	71,80005	38	1,889475		
Abril	entre	0,066416	1	0,066416	0,025161	0,874807
	dentro	100,3074	38	2,639667		
Mai	entre	2,344669	1	2,344669	1,126688	0,295183
	dentro	79,07907	38	2,081028		
Junho	entre	0,145382	1	0,145382	0,08728	0,769272
	dentro	63,29653	38	1,665698		
Julho	entre	0,250424	1	0,250424	0,123546	0,727161
	dentro	77,02469	38	2,026966		
Agosto	entre	0,493933	1	0,493933	0,296535	0,589244
	dentro	63,2959	38	1,665682		
Setembro	entre	0,122149	1	0,122149	0,040323	0,841922
	dentro	115,1126	38	3,02928		
Outubro	entre	0,55583	1	0,55583	0,317084	0,576673
	dentro	66,61178	38	1,752942		
Novembro	entre	0,608586	1	0,608586	0,217949	0,643273
	dentro	106,1085	38	2,792329		
Dezembro	entre	0,115517	1	0,115517	0,049544	0,82505
	dentro	88,60035	38	2,331588		

Tabela 6. Resultados da análise de variância aplicada à razão de mistura para série de Mandacaru-BA, com $\alpha = 0,05$, para razão de mistura. $F_{crítico} = 4,0981$. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$

Mês	Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	gl	Média dos Quadrados	Fobs	Valor-P																																																																																																																						
Janeiro	entre	27,54731	1	27,54731	10,47	0,002516																																																																																																																						
	dentro	99,98068	38	2,63107			Fevereiro	entre	14,28722	1	14,28722	6,962625	0,012	dentro	77,97553	38	2,051988	Março	entre	8,794233	1	8,794233	4,248174	0,046184	dentro	78,66459	38	2,070121	Abril	entre	10,2166	1	10,2166	6,49649	0,01497	dentro	59,76007	38	1,572633	Mai	entre	25,91052	1	25,91052	13,51513	0,000728	dentro	72,85167	38	1,917149	Junho	entre	3,756152	1	3,756152	3,028113	0,089927	dentro	47,13622	38	1,240427	Julho	entre	14,80642	1	14,80642	10,77181	0,002215	dentro	52,23301	38	1,374553	Agosto	entre	14,76852	1	14,76852	20,53894	0,000057	dentro	27,32389	38	0,71905	Setembro	entre	13,45049	1	13,45049	17,51305	0,000163	dentro	29,18502	38	0,768027	Outubro	entre	38,54863	1	38,54863	26,41887	0,0000086	dentro	55,44703	38	1,459132	Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000	dentro	27,58436	38	0,725904	Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro
Fevereiro	entre	14,28722	1	14,28722	6,962625	0,012																																																																																																																						
	dentro	77,97553	38	2,051988			Março	entre	8,794233	1	8,794233	4,248174	0,046184	dentro	78,66459	38	2,070121	Abril	entre	10,2166	1	10,2166	6,49649	0,01497	dentro	59,76007	38	1,572633	Mai	entre	25,91052	1	25,91052	13,51513	0,000728	dentro	72,85167	38	1,917149	Junho	entre	3,756152	1	3,756152	3,028113	0,089927	dentro	47,13622	38	1,240427	Julho	entre	14,80642	1	14,80642	10,77181	0,002215	dentro	52,23301	38	1,374553	Agosto	entre	14,76852	1	14,76852	20,53894	0,000057	dentro	27,32389	38	0,71905	Setembro	entre	13,45049	1	13,45049	17,51305	0,000163	dentro	29,18502	38	0,768027	Outubro	entre	38,54863	1	38,54863	26,41887	0,0000086	dentro	55,44703	38	1,459132	Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000	dentro	27,58436	38	0,725904	Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro	45,9409	38	1,208971								
Março	entre	8,794233	1	8,794233	4,248174	0,046184																																																																																																																						
	dentro	78,66459	38	2,070121			Abril	entre	10,2166	1	10,2166	6,49649	0,01497	dentro	59,76007	38	1,572633	Mai	entre	25,91052	1	25,91052	13,51513	0,000728	dentro	72,85167	38	1,917149	Junho	entre	3,756152	1	3,756152	3,028113	0,089927	dentro	47,13622	38	1,240427	Julho	entre	14,80642	1	14,80642	10,77181	0,002215	dentro	52,23301	38	1,374553	Agosto	entre	14,76852	1	14,76852	20,53894	0,000057	dentro	27,32389	38	0,71905	Setembro	entre	13,45049	1	13,45049	17,51305	0,000163	dentro	29,18502	38	0,768027	Outubro	entre	38,54863	1	38,54863	26,41887	0,0000086	dentro	55,44703	38	1,459132	Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000	dentro	27,58436	38	0,725904	Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro	45,9409	38	1,208971																			
Abril	entre	10,2166	1	10,2166	6,49649	0,01497																																																																																																																						
	dentro	59,76007	38	1,572633			Mai	entre	25,91052	1	25,91052	13,51513	0,000728	dentro	72,85167	38	1,917149	Junho	entre	3,756152	1	3,756152	3,028113	0,089927	dentro	47,13622	38	1,240427	Julho	entre	14,80642	1	14,80642	10,77181	0,002215	dentro	52,23301	38	1,374553	Agosto	entre	14,76852	1	14,76852	20,53894	0,000057	dentro	27,32389	38	0,71905	Setembro	entre	13,45049	1	13,45049	17,51305	0,000163	dentro	29,18502	38	0,768027	Outubro	entre	38,54863	1	38,54863	26,41887	0,0000086	dentro	55,44703	38	1,459132	Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000	dentro	27,58436	38	0,725904	Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro	45,9409	38	1,208971																														
Mai	entre	25,91052	1	25,91052	13,51513	0,000728																																																																																																																						
	dentro	72,85167	38	1,917149			Junho	entre	3,756152	1	3,756152	3,028113	0,089927	dentro	47,13622	38	1,240427	Julho	entre	14,80642	1	14,80642	10,77181	0,002215	dentro	52,23301	38	1,374553	Agosto	entre	14,76852	1	14,76852	20,53894	0,000057	dentro	27,32389	38	0,71905	Setembro	entre	13,45049	1	13,45049	17,51305	0,000163	dentro	29,18502	38	0,768027	Outubro	entre	38,54863	1	38,54863	26,41887	0,0000086	dentro	55,44703	38	1,459132	Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000	dentro	27,58436	38	0,725904	Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro	45,9409	38	1,208971																																									
Junho	entre	3,756152	1	3,756152	3,028113	0,089927																																																																																																																						
	dentro	47,13622	38	1,240427			Julho	entre	14,80642	1	14,80642	10,77181	0,002215	dentro	52,23301	38	1,374553	Agosto	entre	14,76852	1	14,76852	20,53894	0,000057	dentro	27,32389	38	0,71905	Setembro	entre	13,45049	1	13,45049	17,51305	0,000163	dentro	29,18502	38	0,768027	Outubro	entre	38,54863	1	38,54863	26,41887	0,0000086	dentro	55,44703	38	1,459132	Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000	dentro	27,58436	38	0,725904	Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro	45,9409	38	1,208971																																																				
Julho	entre	14,80642	1	14,80642	10,77181	0,002215																																																																																																																						
	dentro	52,23301	38	1,374553			Agosto	entre	14,76852	1	14,76852	20,53894	0,000057	dentro	27,32389	38	0,71905	Setembro	entre	13,45049	1	13,45049	17,51305	0,000163	dentro	29,18502	38	0,768027	Outubro	entre	38,54863	1	38,54863	26,41887	0,0000086	dentro	55,44703	38	1,459132	Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000	dentro	27,58436	38	0,725904	Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro	45,9409	38	1,208971																																																															
Agosto	entre	14,76852	1	14,76852	20,53894	0,000057																																																																																																																						
	dentro	27,32389	38	0,71905			Setembro	entre	13,45049	1	13,45049	17,51305	0,000163	dentro	29,18502	38	0,768027	Outubro	entre	38,54863	1	38,54863	26,41887	0,0000086	dentro	55,44703	38	1,459132	Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000	dentro	27,58436	38	0,725904	Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro	45,9409	38	1,208971																																																																										
Setembro	entre	13,45049	1	13,45049	17,51305	0,000163																																																																																																																						
	dentro	29,18502	38	0,768027			Outubro	entre	38,54863	1	38,54863	26,41887	0,0000086	dentro	55,44703	38	1,459132	Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000	dentro	27,58436	38	0,725904	Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro	45,9409	38	1,208971																																																																																					
Outubro	entre	38,54863	1	38,54863	26,41887	0,0000086																																																																																																																						
	dentro	55,44703	38	1,459132			Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000	dentro	27,58436	38	0,725904	Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro	45,9409	38	1,208971																																																																																																
Novembro	entre	47,8934	1	47,8934	65,97757	0,0000000																																																																																																																						
	dentro	27,58436	38	0,725904			Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163	dentro	45,9409	38	1,208971																																																																																																											
Dezembro	entre	29,4442	1	29,4442	24,35476	0,0000163																																																																																																																						
	dentro	45,9409	38	1,208971																																																																																																																								

5.6 Componente Úmida de Refratividade (Nu)

Os resultados da análise de variância aplicada a componente úmida da refração (Nu) para Petrolina-PE, Bebedouro-PE e Mandacaru-BA são apresentados nas tabelas 7, 8 e 9. Semelhante ao que foi obtido nas análises para razão de mistura, os resultados mostram que para Petrolina-PE (tabela 7) a hipótese nula não deve ser rejeitada. Verifica-se que para todos os meses $F_{obs.} < F_{crít.}$. Além disso, em relação aos valores da média dos quadrados, os únicos meses que tiveram valores acima da média dos quadrados “entre”, foram: janeiro, maio, julho, agosto, setembro, outubro e dezembro.

No caso de Bebedouro-PE (tabela 8) a hipótese nula foi rejeitada para os meses de abril, maio, julho, outubro e novembro.

Tabela 7. Resultados da análise de variância aplicada à componente úmida de refração para série de Petrolina-PE, com $\alpha = 0,05$, para componente úmida de refração. $F_{crítico} = 4,0981$. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$

Mês	Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	gl	Média dos Quadrados	Fobs	Valor-P
Janeiro	entre	47,77274	1	47,77274	0,555484	0,460671
	dentro	3268,078	38	86,00205		
Fevereiro	entre	114,4107	1	114,4107	1,5233	0,224699
	dentro	2854,07	38	75,10711		
Março	entre	167,6049	1	167,6049	3,042692	0,089186
	dentro	2093,208	38	55,08441		
Abril	entre	112,375	1	112,375	1,782182	0,189825
	dentro	2396,081	38	63,05475		
Mai	entre	17,32572	1	17,32572	0,376817	0,542969
	dentro	1747,206	38	45,9791		
Junho	entre	30,86486	1	30,86486	1,140978	0,292185
	dentro	1027,947	38	27,05123		
Julho	entre	3,931419	1	3,931419	0,144813	0,705661
	dentro	1031,631	38	27,14819		
Agosto	entre	1,570015	1	1,570015	0,056633	0,813177
	dentro	1053,453	38	27,72245		
Setembro	entre	1,821842	1	1,821842	0,058866	0,809603
	dentro	1176,069	38	30,94918		
Outubro	entre	61,72594	1	61,72594	0,991582	0,325655
	dentro	2365,498	38	62,24994		
Novembro	entre	204,8903	1	204,8903	2,354586	0,1332
	dentro	3306,668	38	87,01757		
Dezembro	entre	36,93514	1	36,93514	0,412476	0,524571
	dentro	3402,706	38	89,54489		

Tabela 8. Resultados da análise de variância aplicada à componente úmida de refração para série de Bebedouro-PE, com $\alpha = 0,05$, para componente úmida de refração. $F_{crítico} = 4,0981$. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$

Mês	Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	gl	Média dos Quadrados	Fobs	Valor-P
Janeiro	entre	190,986	1	190,986	1,570439	0,2178
	dentro	4621,301	38	121,6132		
Fevereiro	entre	129,6255	1	129,6255	1,91947	0,173994
	dentro	2566,213	38	67,53191		
Março	entre	177,5543	1	177,5543	2,816831	0,101487
	dentro	2395,268	38	63,03336		
Abril	entre	500,2037	1	500,2037	6,853969	0,01263
	dentro	2773,246	38	72,98015		
Maio	entre	741,3648	1	741,3648	10,07618	0,002974
	dentro	2795,888	38	73,576		
Junho	entre	131,4907	1	131,4907	3,032267	0,089715
	dentro	1647,825	38	43,36382		
Julho	entre	411,291	1	411,291	8,981229	0,004786
	dentro	1740,192	38	45,79451		
Agosto	entre	166,5894	1	166,5894	2,914194	0,095963
	dentro	2172,264	38	57,16484		
Setembro	entre	226,1559	1	226,1559	2,25447	0,141494
	dentro	3811,948	38	100,3144		
Outubro	entre	568,5094	1	568,5094	8,975219	0,004799
	dentro	2407,001	38	63,34212		
Novembro	entre	507,4547	1	507,4547	7,748785	0,008329
	dentro	2488,555	38	65,48829		
Dezembro	entre	301,4503	1	301,4503	3,699199	0,061955
	dentro	3096,646	38	81,49069		

Tabela 9. Resultados da análise de variância aplicada à componente úmida de refração para série de Mandacaru-BA, com $\alpha = 0,05$, para componente úmida de refração. $F_{crítico} = 4,0981$. Rejeita-se H_0 se $F_{obs} > F_{crítico}$

Mês	Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	gl	Média dos Quadrados	Fobs	Valor-P																																																																																																																						
Janeiro	entre	230,7752	1	230,7752	1,863364	0,180265																																																																																																																						
	dentro	4706,25	38	123,8487			Fevereiro	entre	123,8773	1	123,8773	1,315717	0,258533	dentro	3577,774	38	94,15194	Março	entre	31,02186	1	31,02186	0,360459	0,551815	dentro	3270,357	38	86,06202	Abril	entre	0,13779	1	0,13779	0,001441	0,969913	dentro	3632,346	38	95,58806	Mai	entre	252,1171	1	252,1171	3,001835	0,091281	dentro	3191,532	38	83,98767	Junho	entre	0,105594	1	0,105594	0,001457	0,969753	dentro	2754,304	38	72,48168	Julho	entre	8,386533	1	8,386533	0,092685	0,762452	dentro	3438,391	38	90,48398	Agosto	entre	84,10555	1	84,10555	2,280794	0,139256	dentro	1401,271	38	36,87556	Setembro	entre	66,86488	1	66,86488	1,506495	0,227224	dentro	1686,607	38	44,38439	Outubro	entre	433,1962	1	433,1962	7,396595	0,009798	dentro	2225,545	38	58,56698	Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013	dentro	2380,235	38	62,63775	Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro
Fevereiro	entre	123,8773	1	123,8773	1,315717	0,258533																																																																																																																						
	dentro	3577,774	38	94,15194			Março	entre	31,02186	1	31,02186	0,360459	0,551815	dentro	3270,357	38	86,06202	Abril	entre	0,13779	1	0,13779	0,001441	0,969913	dentro	3632,346	38	95,58806	Mai	entre	252,1171	1	252,1171	3,001835	0,091281	dentro	3191,532	38	83,98767	Junho	entre	0,105594	1	0,105594	0,001457	0,969753	dentro	2754,304	38	72,48168	Julho	entre	8,386533	1	8,386533	0,092685	0,762452	dentro	3438,391	38	90,48398	Agosto	entre	84,10555	1	84,10555	2,280794	0,139256	dentro	1401,271	38	36,87556	Setembro	entre	66,86488	1	66,86488	1,506495	0,227224	dentro	1686,607	38	44,38439	Outubro	entre	433,1962	1	433,1962	7,396595	0,009798	dentro	2225,545	38	58,56698	Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013	dentro	2380,235	38	62,63775	Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro	2145,795	38	56,4683								
Março	entre	31,02186	1	31,02186	0,360459	0,551815																																																																																																																						
	dentro	3270,357	38	86,06202			Abril	entre	0,13779	1	0,13779	0,001441	0,969913	dentro	3632,346	38	95,58806	Mai	entre	252,1171	1	252,1171	3,001835	0,091281	dentro	3191,532	38	83,98767	Junho	entre	0,105594	1	0,105594	0,001457	0,969753	dentro	2754,304	38	72,48168	Julho	entre	8,386533	1	8,386533	0,092685	0,762452	dentro	3438,391	38	90,48398	Agosto	entre	84,10555	1	84,10555	2,280794	0,139256	dentro	1401,271	38	36,87556	Setembro	entre	66,86488	1	66,86488	1,506495	0,227224	dentro	1686,607	38	44,38439	Outubro	entre	433,1962	1	433,1962	7,396595	0,009798	dentro	2225,545	38	58,56698	Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013	dentro	2380,235	38	62,63775	Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro	2145,795	38	56,4683																			
Abril	entre	0,13779	1	0,13779	0,001441	0,969913																																																																																																																						
	dentro	3632,346	38	95,58806			Mai	entre	252,1171	1	252,1171	3,001835	0,091281	dentro	3191,532	38	83,98767	Junho	entre	0,105594	1	0,105594	0,001457	0,969753	dentro	2754,304	38	72,48168	Julho	entre	8,386533	1	8,386533	0,092685	0,762452	dentro	3438,391	38	90,48398	Agosto	entre	84,10555	1	84,10555	2,280794	0,139256	dentro	1401,271	38	36,87556	Setembro	entre	66,86488	1	66,86488	1,506495	0,227224	dentro	1686,607	38	44,38439	Outubro	entre	433,1962	1	433,1962	7,396595	0,009798	dentro	2225,545	38	58,56698	Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013	dentro	2380,235	38	62,63775	Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro	2145,795	38	56,4683																														
Mai	entre	252,1171	1	252,1171	3,001835	0,091281																																																																																																																						
	dentro	3191,532	38	83,98767			Junho	entre	0,105594	1	0,105594	0,001457	0,969753	dentro	2754,304	38	72,48168	Julho	entre	8,386533	1	8,386533	0,092685	0,762452	dentro	3438,391	38	90,48398	Agosto	entre	84,10555	1	84,10555	2,280794	0,139256	dentro	1401,271	38	36,87556	Setembro	entre	66,86488	1	66,86488	1,506495	0,227224	dentro	1686,607	38	44,38439	Outubro	entre	433,1962	1	433,1962	7,396595	0,009798	dentro	2225,545	38	58,56698	Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013	dentro	2380,235	38	62,63775	Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro	2145,795	38	56,4683																																									
Junho	entre	0,105594	1	0,105594	0,001457	0,969753																																																																																																																						
	dentro	2754,304	38	72,48168			Julho	entre	8,386533	1	8,386533	0,092685	0,762452	dentro	3438,391	38	90,48398	Agosto	entre	84,10555	1	84,10555	2,280794	0,139256	dentro	1401,271	38	36,87556	Setembro	entre	66,86488	1	66,86488	1,506495	0,227224	dentro	1686,607	38	44,38439	Outubro	entre	433,1962	1	433,1962	7,396595	0,009798	dentro	2225,545	38	58,56698	Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013	dentro	2380,235	38	62,63775	Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro	2145,795	38	56,4683																																																				
Julho	entre	8,386533	1	8,386533	0,092685	0,762452																																																																																																																						
	dentro	3438,391	38	90,48398			Agosto	entre	84,10555	1	84,10555	2,280794	0,139256	dentro	1401,271	38	36,87556	Setembro	entre	66,86488	1	66,86488	1,506495	0,227224	dentro	1686,607	38	44,38439	Outubro	entre	433,1962	1	433,1962	7,396595	0,009798	dentro	2225,545	38	58,56698	Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013	dentro	2380,235	38	62,63775	Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro	2145,795	38	56,4683																																																															
Agosto	entre	84,10555	1	84,10555	2,280794	0,139256																																																																																																																						
	dentro	1401,271	38	36,87556			Setembro	entre	66,86488	1	66,86488	1,506495	0,227224	dentro	1686,607	38	44,38439	Outubro	entre	433,1962	1	433,1962	7,396595	0,009798	dentro	2225,545	38	58,56698	Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013	dentro	2380,235	38	62,63775	Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro	2145,795	38	56,4683																																																																										
Setembro	entre	66,86488	1	66,86488	1,506495	0,227224																																																																																																																						
	dentro	1686,607	38	44,38439			Outubro	entre	433,1962	1	433,1962	7,396595	0,009798	dentro	2225,545	38	58,56698	Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013	dentro	2380,235	38	62,63775	Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro	2145,795	38	56,4683																																																																																					
Outubro	entre	433,1962	1	433,1962	7,396595	0,009798																																																																																																																						
	dentro	2225,545	38	58,56698			Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013	dentro	2380,235	38	62,63775	Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro	2145,795	38	56,4683																																																																																																
Novembro	entre	755,6034	1	755,6034	12,06307	0,0013																																																																																																																						
	dentro	2380,235	38	62,63775			Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324	dentro	2145,795	38	56,4683																																																																																																											
Dezembro	entre	239,5613	1	239,5613	4,242402	0,046324																																																																																																																						
	dentro	2145,795	38	56,4683																																																																																																																								

Uma síntese dos resultados obtidos com a aplicação da ANOVA é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2. Análise de rejeição da hipótese nula (H_0) para razão de mistura, r (g/kg) e para o termo úmido da refratividade atmosférica, Nu (Unid. De Ref.).

H0 = médias mensais não mudaram no período pós- expansão agrícola						
	Petrolina		Bebedouro		Mandacaru	
	r (g/kg)	Nu	r (g/kg)	Nu	r (g/kg)	Nu
Janeiro					Rejeita	
Fevereiro					Rejeita	
Março					Rejeita	
Abril				Rejeita	Rejeita	
Maio				Rejeita	Rejeita	
Junho						
Julho				Rejeita	Rejeita	
Agosto					Rejeita	
Setembro					Rejeita	
Outubro				Rejeita	Rejeita	Rejeita
Novembro				Rejeita	Rejeita	Rejeita
Dezembro					Rejeita	Rejeita

5.7 Variação Média Mensal da Razão de Mistura (r) e da Refratividade (Nu)

Os resultados da ANOVA permitiram detectar localidades cujas mudanças na umidade e na refratividade mensal para Petrolina, Bebedouro e Mandacaru foram consideradas significativas do ponto de vista estatísticos. No entanto, o método não permite avaliar se essas alterações foram positivas (aumento) ou negativas (redução nos valores).

Nas figuras 13 e 14 são apresentadas a variação média mensal da razão de mistura e da componente úmida de refratividade (Nu), nos períodos de 1975-1994 e 1995-2014 para Petrolina-PE, Bebedouro-PE e Mandacaru-BA. É possível observar um ciclo sazonal bem definido para razão de mistura com valores mais elevados no período chuvoso e valores mais baixos no período seco independentemente da localidade.

Em Petrolina-PE (Fig. 13.a) verifica-se uma redução nos valores da razão de mistura e da Nu nos meses de janeiro a junho quando comparados os períodos de ‘1975-1994’ e ‘1995-2014’. A partir do mês de julho, com exceção do mês de agosto, o comportamento se inverte. Na análise da variável Nu , (Fig. 14.a) verifica-se nitidamente uma queda mais acentuada nos valores dos quatro primeiros meses (janeiro, fevereiro, março e abril). De março a abril a

redução foi pequena na comparação entre os dois períodos. Nos meses de outubro, novembro e dezembro o comportamento se inverte.

Em Bebedouro-PE, (Fig. 13.b) perímetro de irrigação situado na margem esquerda do rio São Francisco, nota-se que não existe um padrão de comportamento bem definido para razão de mistura, quando se compara a evolução mensal da variável nos dois períodos. Tem-se uma leve queda da umidade nos meses de janeiro e fevereiro e um aumento visivelmente mais acentuado no mês de maio. Ao longo do período de 1975-1994 ocorreu uma frequência maior (7 meses) com valores mais elevados da razão de mistura em relação a 1995-2014, apenas 3 meses ficaram com valores acima.

Na análise da componente Nu para Bebedouro-PE (Fig.14.b) verifica-se um aumento substancial nas médias mensais durante todo o ano. Este resultado demonstra um comportamento de certa forma surpreendente se confrontado com o comportamento observado na razão de mistura. Entretanto, é importante ressaltar que no teste da ANOVA para Bebedouro, como pode ser visto no Quadro 2, o resultado da análise foi semelhante para as duas variáveis. Neste caso, uma relação direta entre a umidade (r (g/kg)) e a componente Nu não parece evidente. No entanto, esse resultado evidencia que as mudanças ambientais ocorridas no período 1995-2014 provocaram alterações estatisticamente significativas nas duas variáveis.

No caso de Mandacaru-BA (Fig. 13.c e 14.c) nota-se um aumento nos valores de r (g/kg) e de Nu para todos os meses, sendo bem mais acentuado no caso da umidade. O indicativo de uma área mais extensa coberta com vegetação no entorno de Mandacaru, observada na imagem do NDVI apresentada na Figura 9b, comprova o efeito da expansão agrícola no teor de vapor da atmosfera. Os resultados da ANOVA, indicam mudança estatisticamente significativa na umidade do ar para todos os meses com exceção do mês de junho (Quadro 2). O mesmo resultado não foi observado para a variável Nu. Do ponto de vista estatístico, verificaram-se mudanças significativas apenas para os meses de outubro, novembro e dezembro (Quadro 2).

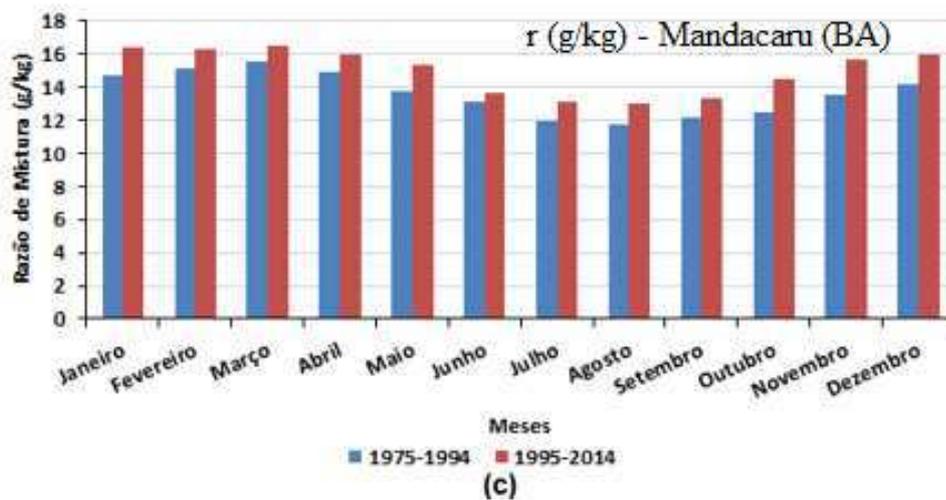
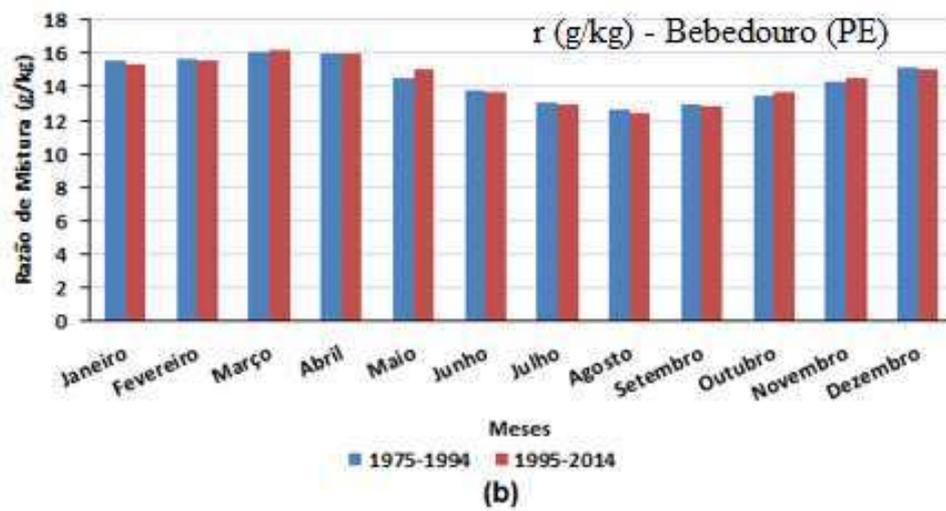
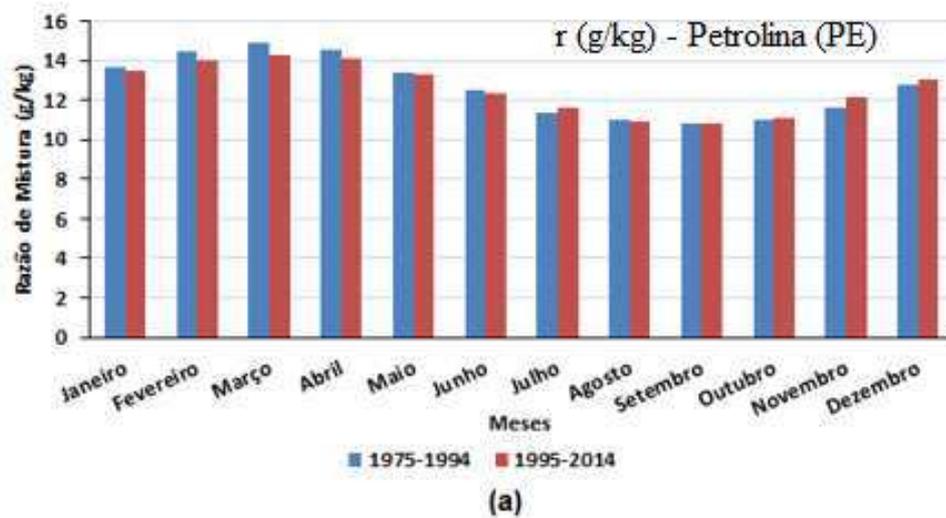


Figura 13. Médias mensais da razão de mistura, no período 1975-1994 e 1995-2014 para (a) Petrolina-PE, (b) Bebedouro-PE e (c) Mandacaru-BA.

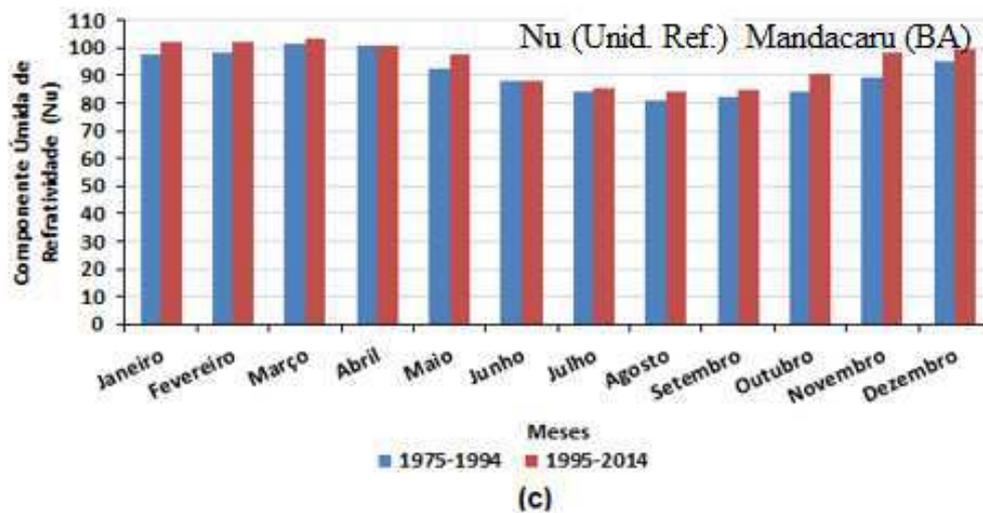
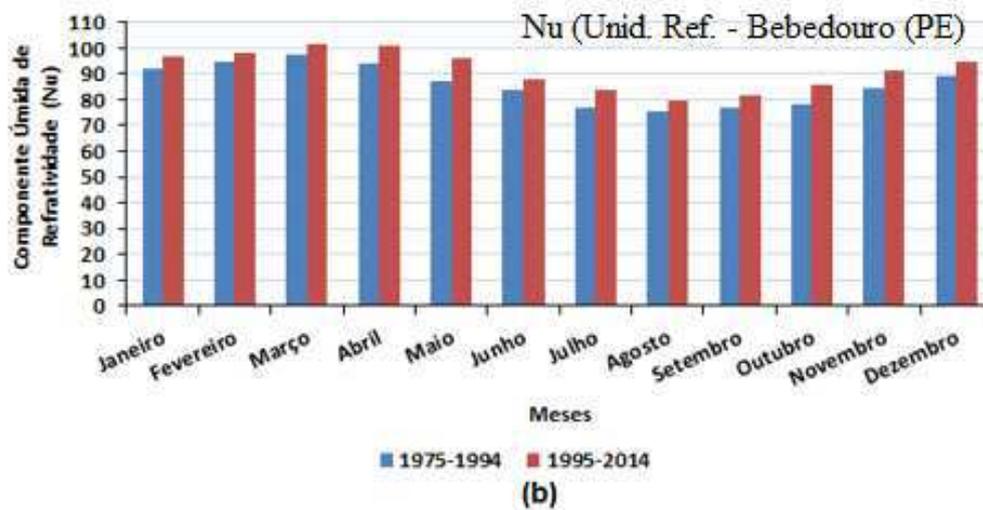
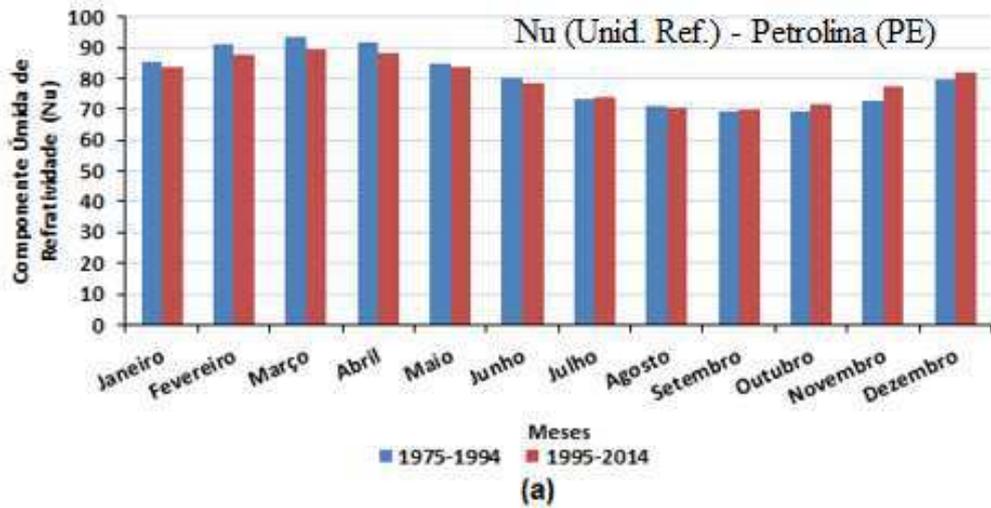


Figura 14. Médias mensais da componente úmida de refratividade, no período 1975-1994 e 1995-2014 para (a) Petrolina-PE, (b) Bebedouro-PE e (c) Mandacaru-BA.

5.8 Relação entre Umidade Atmosférica e a Componente Úmida de Refratividade

Conforme mencionado anteriormente, existe uma forte conexão entre a variação espacial e vertical no teor de vapor da atmosfera e mudanças no padrão da refração atmosférica. Alguns autores demonstram a importância de analisar mudanças no padrão espacial e temporal da umidade como indicativo de variações no índice de refração atmosféricas e geração condições anômalas de radiopropagação (Ajileye, (2016), Correia, et. al., (2018); Correia, et. al., (2013)). No entanto, na análise de variância foi possível detectar que para algumas localidades analisadas, o grau de impacto das mudanças ambientais decorrentes da expansão agrícola foi diferente para as variáveis r (g/kg) e 'Nu'.

Nas Figuras 15, 16, 17 e 18, são apresentados gráficos de dispersão entre a razão de mistura e a componente Nu, construídos separadamente para os períodos de 1975-1994 e 1995-2014. Os meses de janeiro fevereiro, foram usados como representativos do período úmido na região e os meses de agosto e setembro como representativos do período de estiagem construídos para as localidades de Petrolina, Bebedouro e Mandacaru. Os diagramas de dispersão incluem a reta de regressão e o coeficiente de determinação.

O coeficiente de determinação (R^2) mede a variação Nu que é explicada pela variável independente razão de mistura (r (g/Kg)). Em outras palavras trata-se de um índice que indica a porcentagem de explicação da variável dependente (Nu) em função da variável independente com variação entre 1% e 100%. É, portanto, um parâmetro importante, no modelo de regressão linear assumido neste trabalho e quanto maior melhor. As figuras do coeficiente de determinação para o período completo dos meses são apresentadas no Anexo A deste trabalho.

Em todos os casos apresentados (período úmido e seco) observam-se correlações positivas entre a razão de mistura e a componente úmida da refratividade. Informações mais relevantes podem ser obtidas quando observados os valores dos coeficientes de determinação.

Verifica-se que independentemente da sazonalidade (período úmido ou seco) os coeficientes de determinação foram superiores a 0,70. "Esse resultado indica que a razão de mistura pode ser considerada um bom preditor da Componente úmida da refratividade 'Nu'". Apenas no mês de janeiro observa-se uma maior dispersão dos dados no período 1995-2014 com $r^2 = 0,67$. De acordo com a equação 2 ($Nu = (3,7310^5 \frac{e}{T^2})$) a componente 'Nu' depende

também temperatura, é provável que nesse período, 33% da variabilidade de Nu seja explicada pela variabilidade na temperatura da superfície.

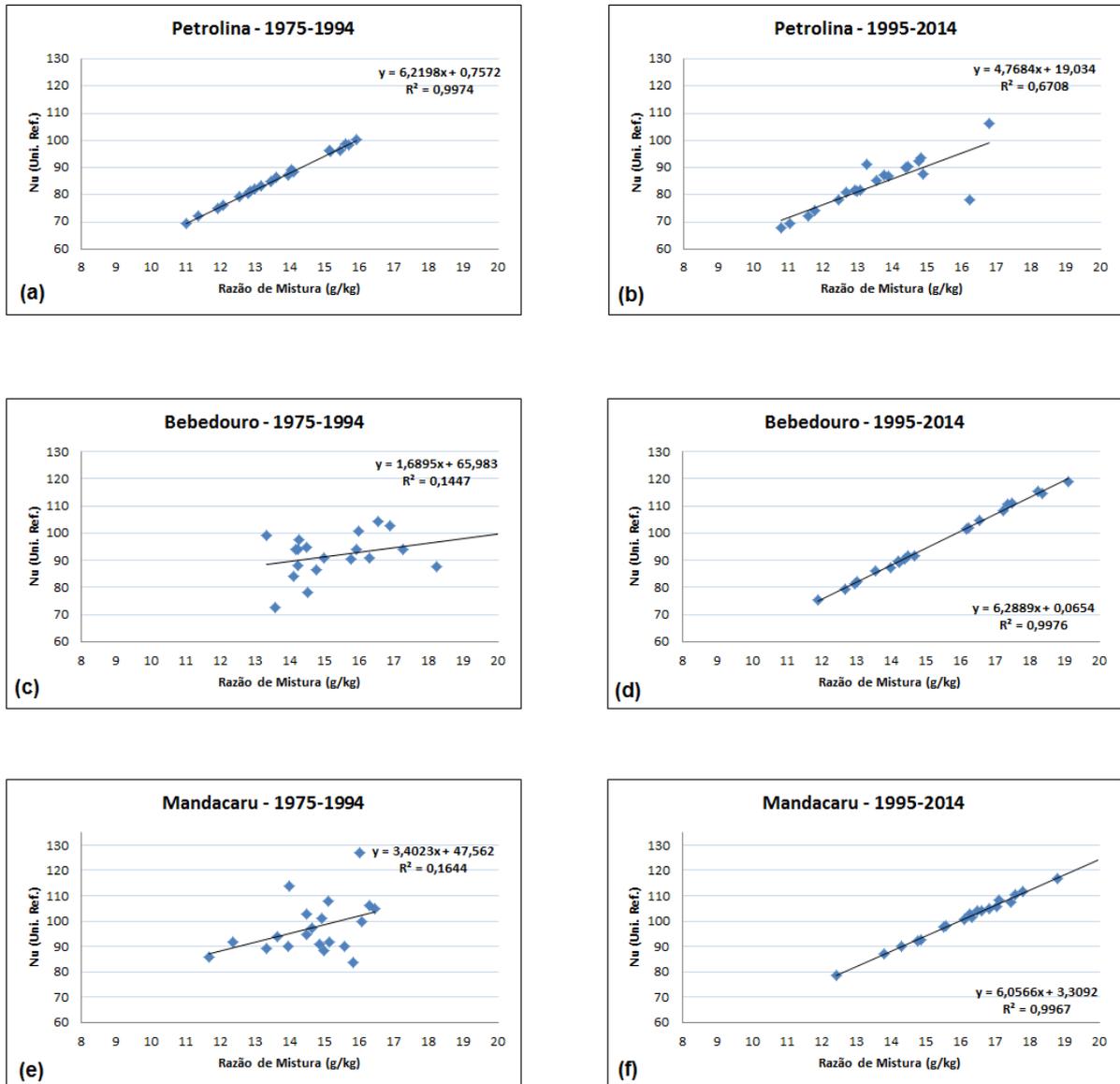


Figura 15. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de janeiro nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

Por outro lado, valores do coeficiente de determinação da ordem de 0,14 e 0,16 para o mês de janeiro respectivamente em Bebedouro PE, e Mandacaru (BA), no período de 1975-1994, indicam que a razão de mistura explica apenas 15 % da variabilidade observada na componente ‘Nu’. Neste caso, a influência da temperatura não pode ser descartada na

avaliação do comportamento de Nu. Verifica-se, entretanto, que no período de 1994-2014 para Bebedouro PE e Mandacaru (BA), os valores do coeficiente de determinação são extremamente altos, da ordem de 0,99. Esse resultado indica que as mudanças na cobertura do solo associada com o aumento da agricultura contribuíram para aumentar a umidade do ar e transformar a razão de mistura num excelente preditor da refratividade local.

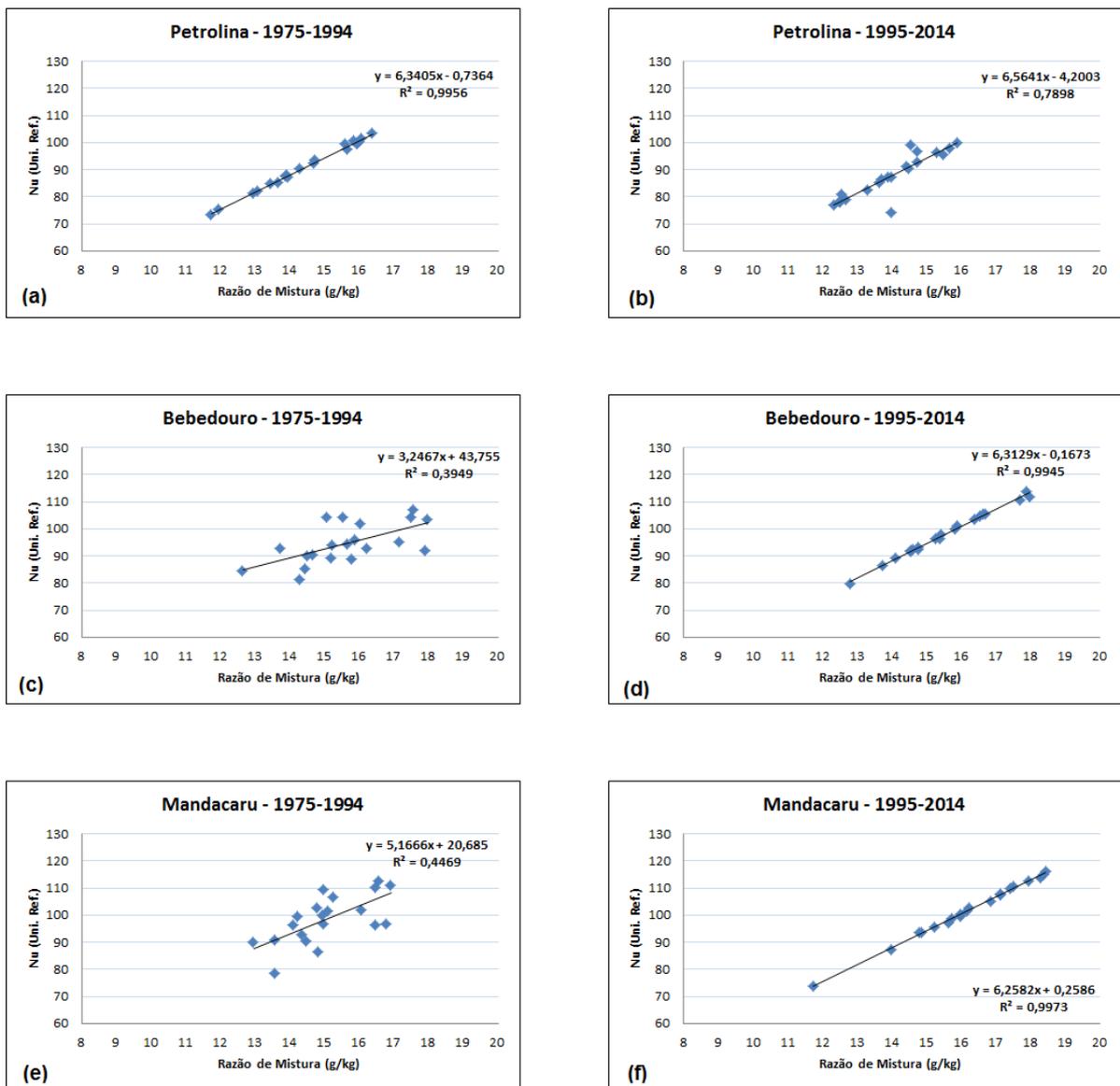


Figura 16. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de fevereiro nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (e) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

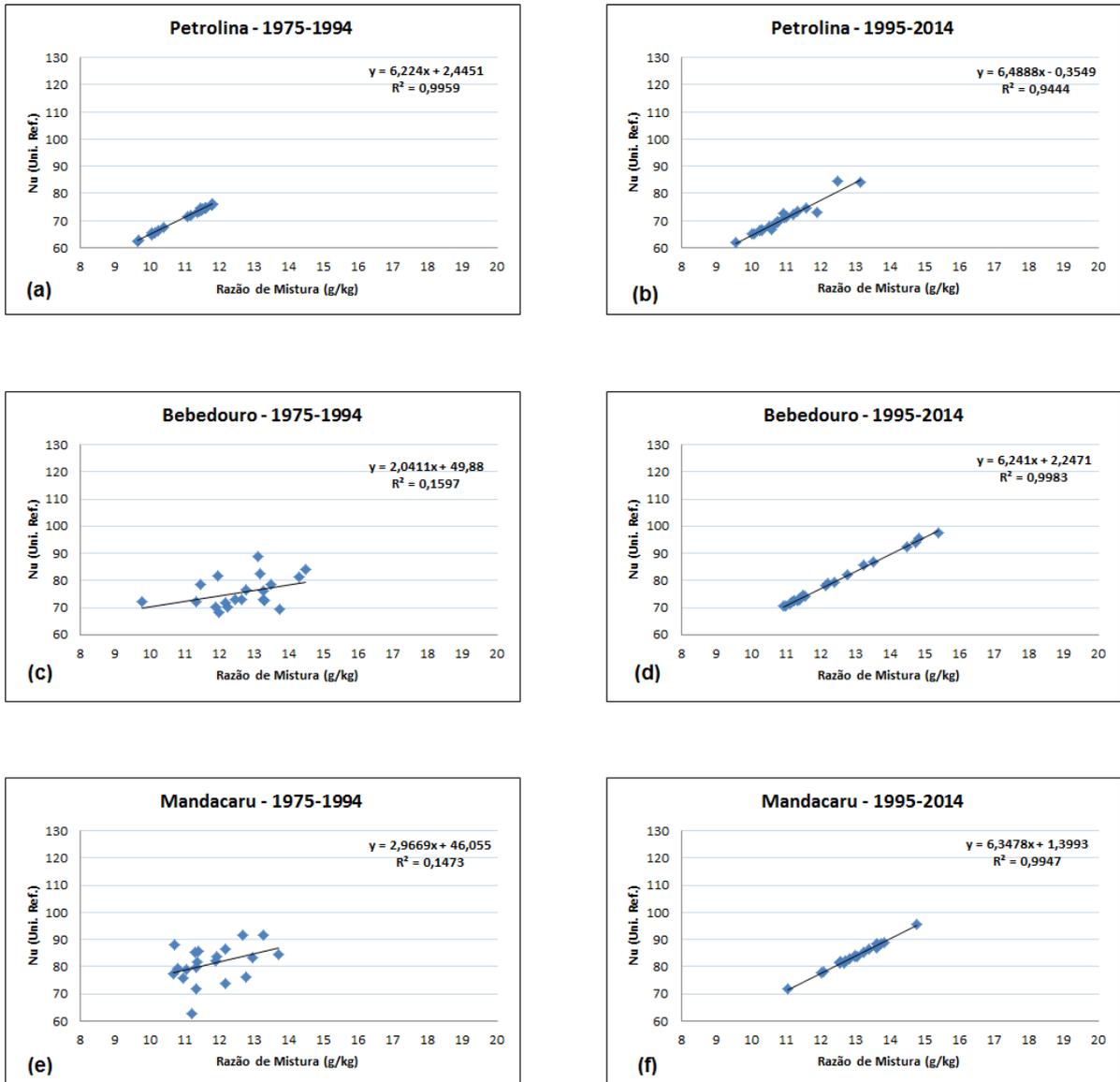


Figura 17. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de agosto nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

Os valores do coeficiente de determinação obtidos para os meses de agosto e setembro (período seco) indicam comportamento semelhante observado nos meses do período úmido.

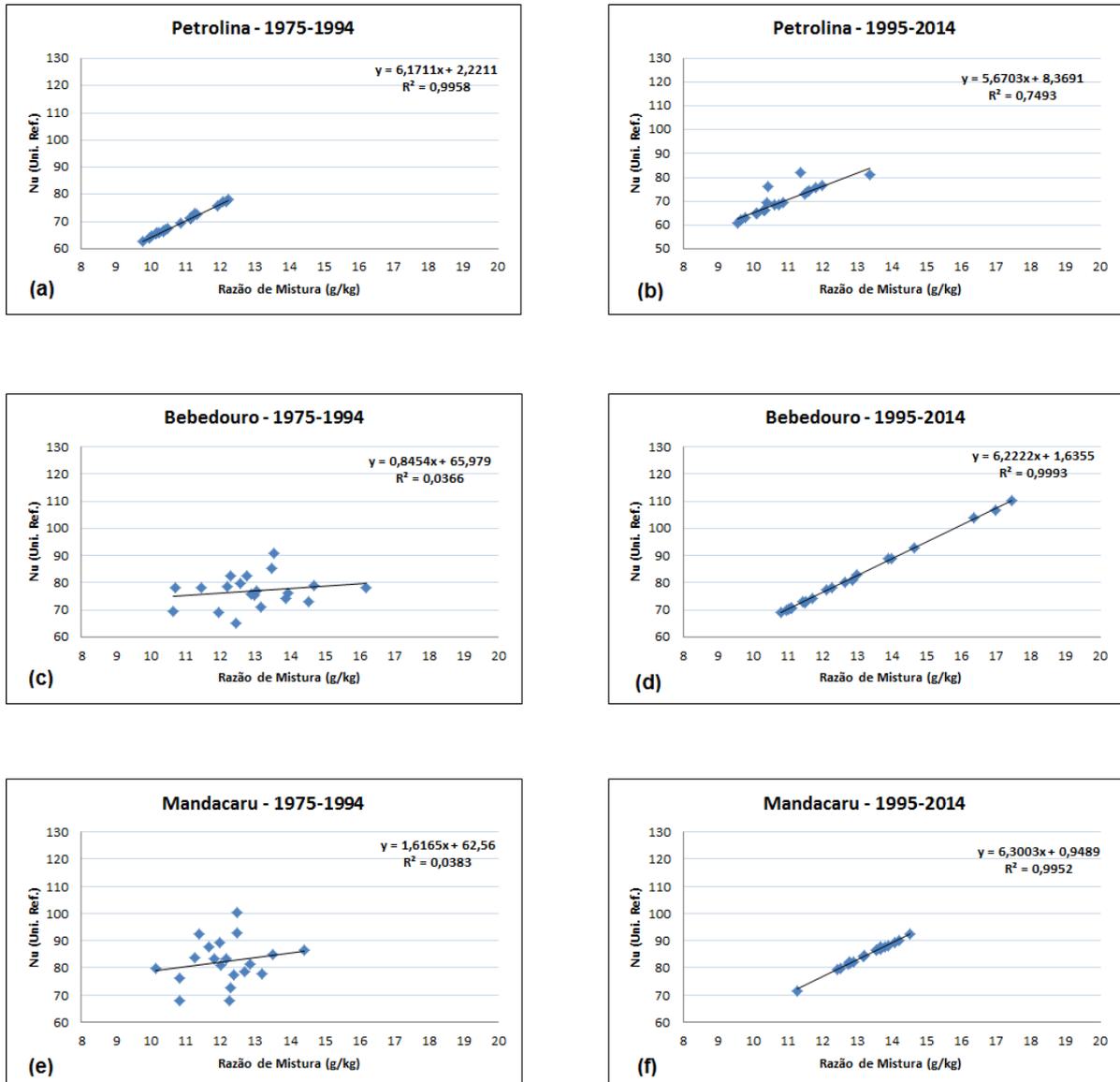


Figura 18. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de setembro nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

5.9 Estatística de Dutos Atmosféricos

Nesta seção é apresentada uma estatística da frequência de situações típicas de condições anômalas de propagação decorrentes da variação vertical da umidade e consequentemente da refração atmosférica no período de 2000 a 2014. A ausência de dados de sondagens atmosféricas entre 1975-1999 impediu a avaliação no período anterior a 2000.

O número de ocorrências de camadas atmosféricas com gradientes de refratividade anômalos no mês de janeiro, detectado no período de 2000 a 2014 (esse período inclui os anos

com indicação de maior tendência de aumento de Nu) é apresentado na tabela 10. Verifica-se uma alta variabilidade no tipo de condições favoráveis a ocorrência de propagação anômala: sub-refração, super-refração e dutos atmosféricos (elevados e de superfície).

De um total de 367 dias com observações diárias de dados de ar superior, realizadas às 12 UTC em Petrolina-PE, foram detectados 473 casos de sub-refração, 623 de super-refração, 241 registros de dutos elevados e 67 dutos de superfície.

Observa-se uma alta variabilidade nas condições anômalas de propagação em todo período analisado. Mas, de modo geral, um aumento mais pronunciado das condições anômalas de refratividade ocorre visivelmente a partir do ano de 2007 quando comparado com o período de 2000 a 2006. O ano de 2007 foi considerado bastante significativo do ponto de vista hidrológico. O reservatório de Sobradinho atingiu 100% da sua capacidade de armazenamento de água (ANA, 2007). Nestes casos a brisa lacustre é mais intensa e transporta mais umidade para região de Petrolina.

Nestes casos, fatores locais parecem ter sido determinantes na mudança no padrão de variabilidade de Nu. Essa hipótese é em parte confirmada pela tendência de aumento nos valores do Nu para Mandacaru, detectada nos gráficos do *Box-Plot* (Figura 11.b). O mesmo comportamento não é percebido para Bebedouro (PE) (Fig. 10.a). Apesar da necessidade de análises mais detalhadas, esse resultado pode ser um forte indicativo da influência da expansão da agricultura irrigada na região de Mandacaru (BA). Indicativo semelhante foi detectado nas análises do NDVI (Sensoriamento remoto).

Os anos de 2001 e 2007 chama bastante atenção pela alta frequência de dutos de superfície (Tabela 10). Nestes anos a precipitação na região foi bem abaixo da normal climatológica. Em situações de baixa umidade relativa tem-se aumento da evapotranspiração e do teor de vapor próximo à superfície. A descontinuidade na distribuição de vapor de água na baixa atmosfera representa a principal causa para formação de dutos atmosféricos de superfície.

Tabela 10. Distribuição das ocorrências das camadas atmosféricas com gradientes anômalos de refratividade.

CONDIÇÕES ANÔMALAS	Duto de Superfície	Duto Elevado	Sub-refração	Super-refração
2000	2	8	24	50
2001	14	13	26	45
2002	0	0	5	7
2003	0	9	22	55
2004	8	7	14	12
2005	6	5	20	39
2006	3	2	4	5
2007	15	17	28	57
2008	2	30	55	47
2009	3	29	46	44
2010	1	11	36	27
2011	2	15	49	54
2012	6	16	46	44
2013	3	19	31	48
2014	2	60	67	89
TOTAL	67	241	473	623

Esse comportamento é facilmente identificado nos perfis verticais do índice de refração modificado (M), da razão de mistura (g/kg) e das temperaturas do ar e do ponto de orvalho elaborados para os dias 26 e 31 de janeiro de 2007 as 12:00 UTC, apresentados na Figura 19.

A queda brusca de M ($dM/dZ < 0$) observada nos perfis verticais do índice de refração modificado, indica a ocorrência de dutos de superfície nos dias 26 (Fig. 19.a) e 31 de janeiro (Fig. 19.d).

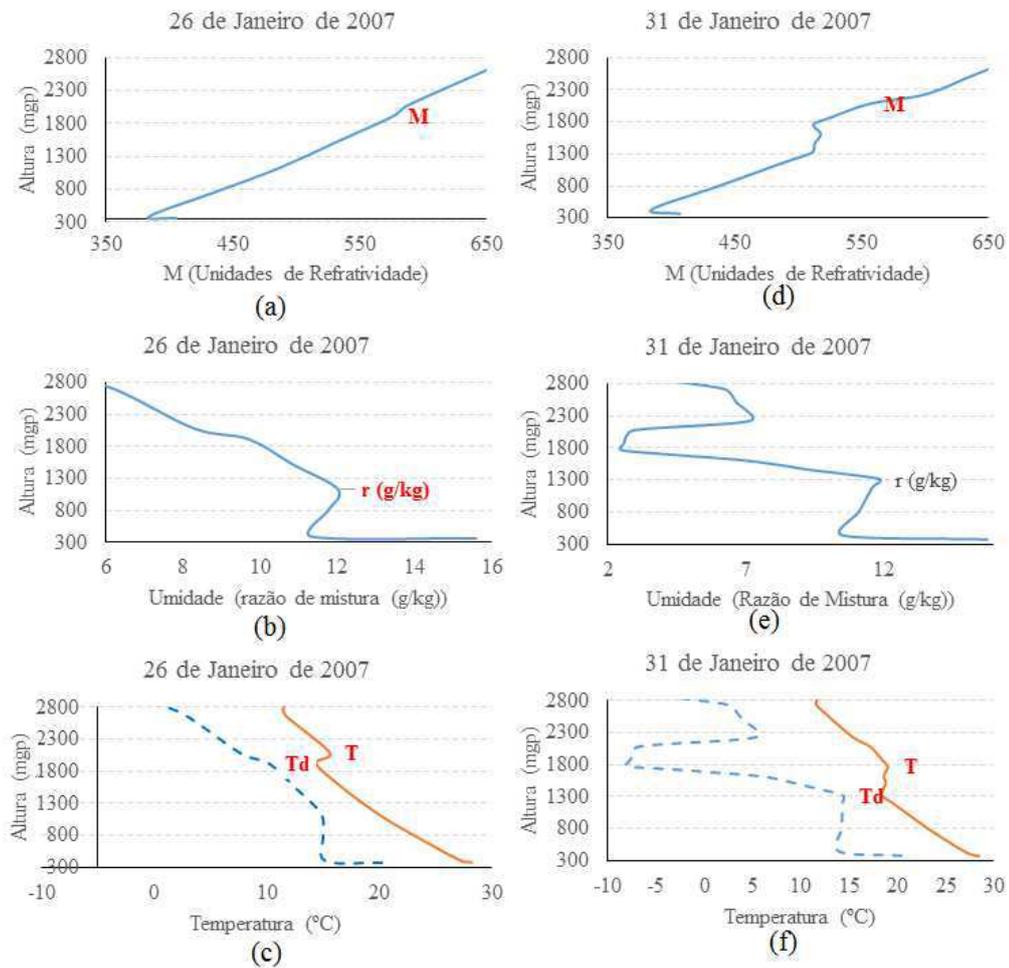


Figura 19. Perfis verticais do índice de refração modificado, da razão de mistura e das temperaturas do ar e do ponto de orvalho as 12 UTC para: 26 de janeiro de 2007 (a,b,c) e 31 de janeiro de 2007 (d,e,f).

5.10 Distribuição Espacial da Componente Úmida de Refratividade

Nas Figuras 20 e 21 são apresentados mapas da distribuição espacial da refratividade mensal (componente úmida) elaboradas com base nos dados das normais climatológicas do INMET (1961-1990) com e sem a inclusão dos dados de Bebedouro e Mandacaru. Conforme mencionado anteriormente a componente úmida é em parte uma medida do teor de umidade na atmosfera.

Como um dos objetivos desse estudo é avaliar o a associação entre alterações na cobertura e uso da terra e mudanças no padrão espacial da refratividade, foram selecionados os meses de janeiro e fevereiro (Fig. 20) como representativos dos períodos úmidos e os meses de setembro e outubro como representativos do período seco (Fig. 21). Nas ilustrações,

o quadrado com linhas tracejadas na cor preta, delimita a região onde estão localizadas as estações de Petrolina (PE), Bebedouro (PE) e Mandacaru (BA).

Além das características sazonais evidenciadas na distribuição espacial de Nu, com valores mais altos nos meses úmidos, e mais baixos nos meses do período de estiagem, pode-se notar diferenças significantes entre os valores dessa variável nas regiões litorâneas e no interior da região Nordeste. Valores mínimos são observados no semiárido. No entanto, os núcleos com valores máximos na região de Bebedouro e Mandacaru representam o resultado mais importante dessa análise. Resultados semelhantes foram obtidos por Correia, et. al., 2013.

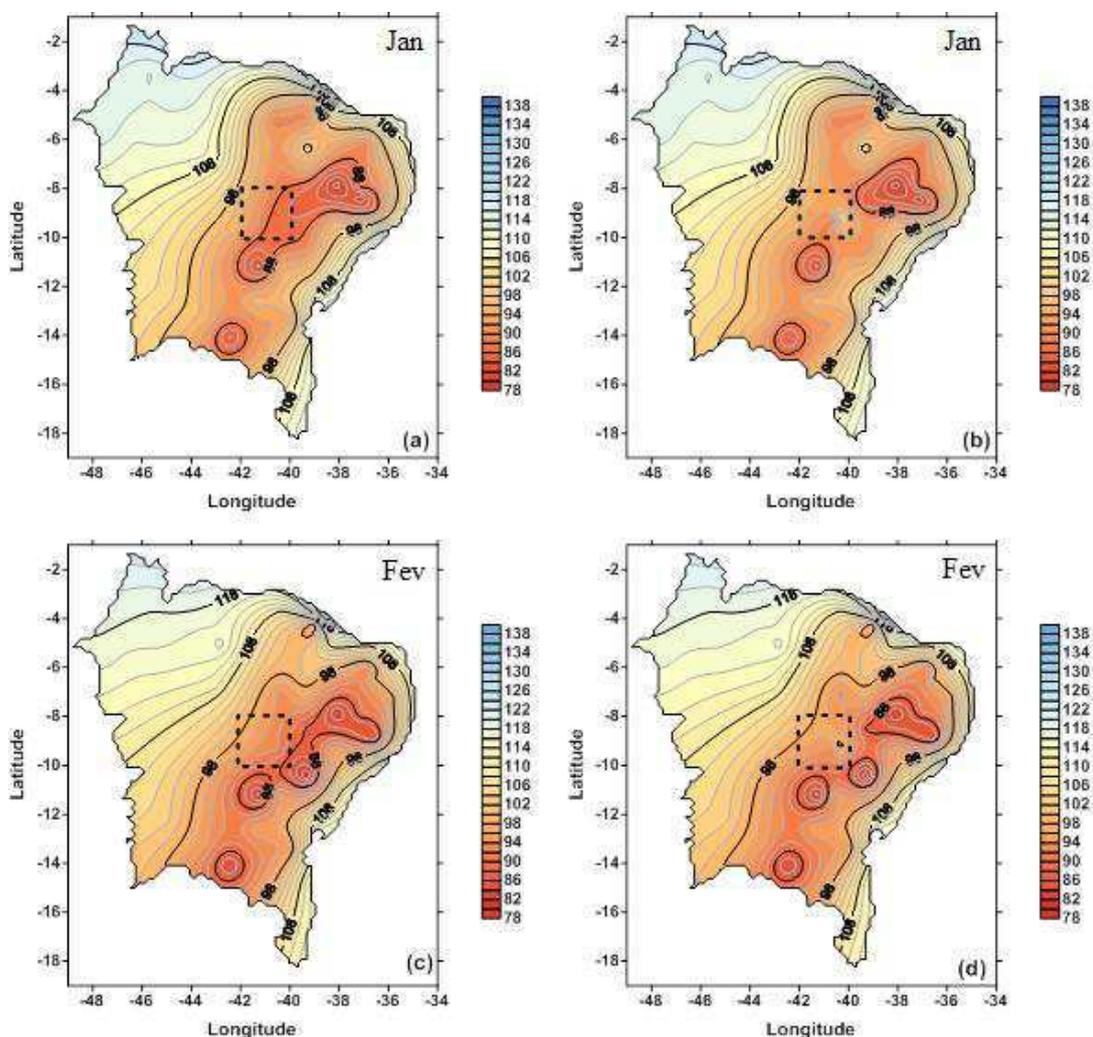


Figura 20. Configuração espacial da componente úmida de refratividade (Nu) para os meses de janeiro e fevereiro da série das normais climatológicas de 1961-1990: (a) e (c) sem a inclusão de Bebedouro e Mandacaru; (b) e (d) com a inclusão de Bebedouro e Mandacaru, a área delimitada pelo quadrado tracejado com coloração preto representa a região de estudo (equivalente de 8 a 10 ° S e 40 a 42 ° W).

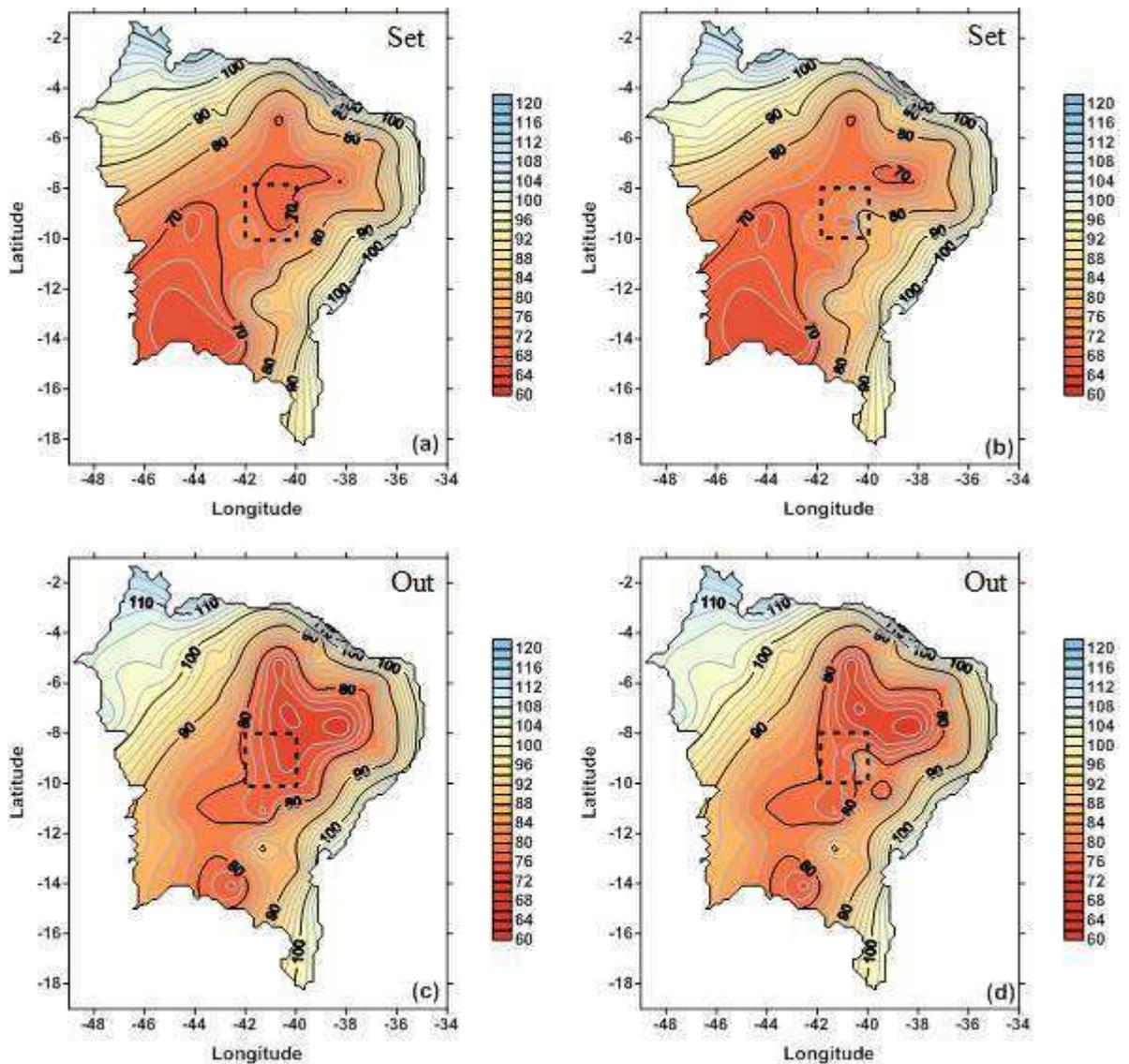


Figura 21. Configuração espacial da componente úmida de refratividade (N_u) para os meses de setembro e outubro da série das normais climatológicas de 1961-1990: (a) e (c) sem a inclusão de Bebedouro e Mandacaru; (b) e (d) com a inclusão de Bebedouro e Mandacaru, a área delimitada pelo quadrado tracejado com coloração preto representa a região de estudo (equivalente de 8 a 10 ° S e 40 a 42 ° W).

Análise semelhante foi realizada utilizando as novas normais climatológicas disponibilizadas pelo INMET, referentes ao período de 1981-2010. As figuras 22 e 23 representa a configuração espacial da refratividade (N_u) para os meses de janeiro (Fig. 22.a e 22.b), fevereiro (Fig. 22.c e 22.d), setembro (Fig. 23.a e 23.b) e outubro (Fig. 23.c e 23.d), usando a série de dados das normais climatológicas do período de 1981-2010 e dados das

estações meteorológicas de Bebedouro-PE e Mandacaru-BA. Foram considerados os mesmos critérios de análise usados na elaboração dos mapas apresentados nas Figuras 16 e 17 com a inclusão e sem a inclusão das estações meteorológicas de Bebedouro-PE e Mandacaru-BA.

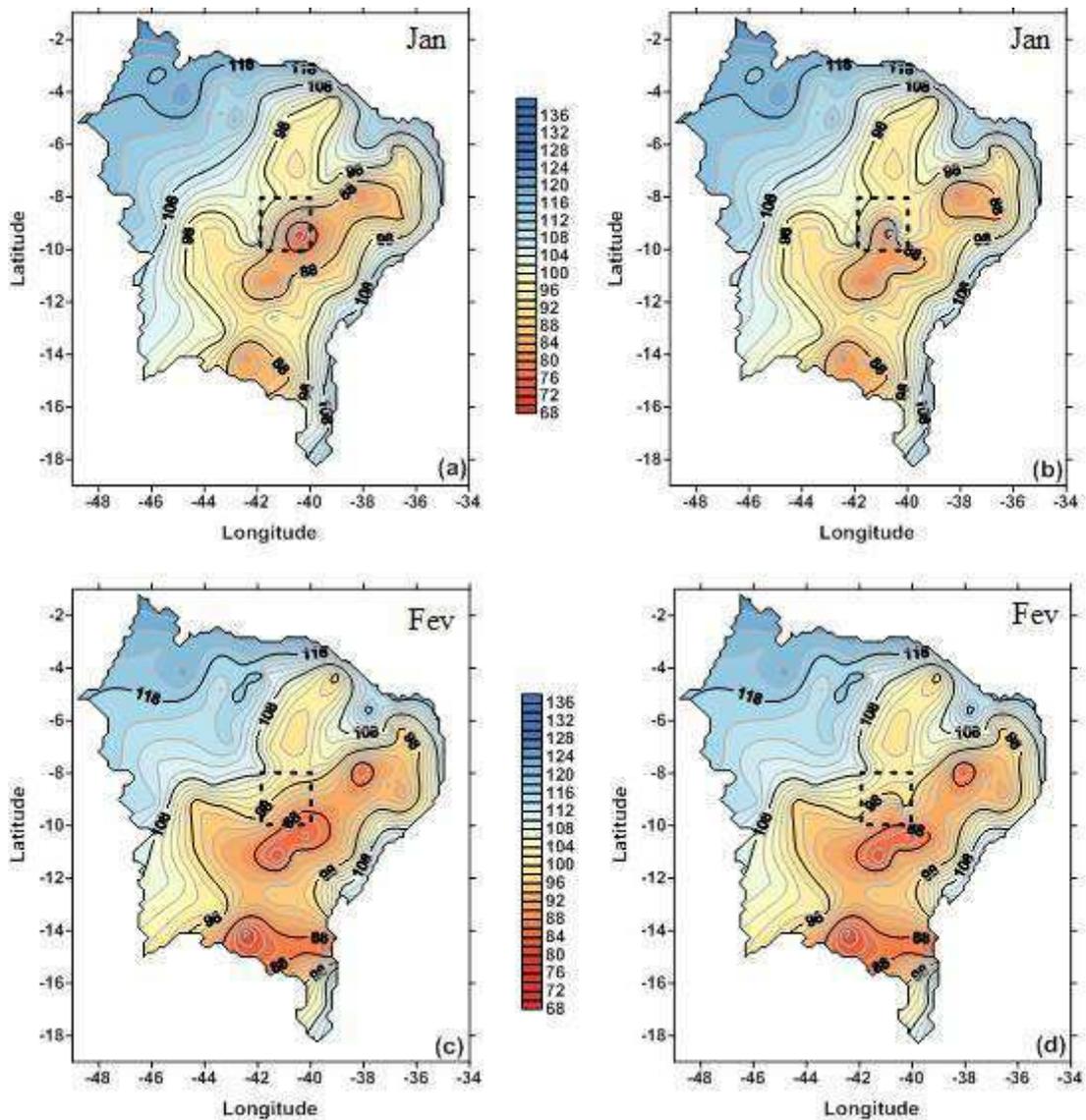


Figura 22. Configuração espacial da componente úmida de refratividade (N_u) para os meses de janeiro e fevereiro da série das normais climatológicas de 1981-2010: (a) e (c) sem a inclusão de Bebedouro e Mandacaru; (b) e (d) com a inclusão de Bebedouro e Mandacaru, a área delimitada pelo quadrado tracejado com coloração preto representa a região de estudo (equivalente de 8 a 10 ° S e 40 a 42 ° W).

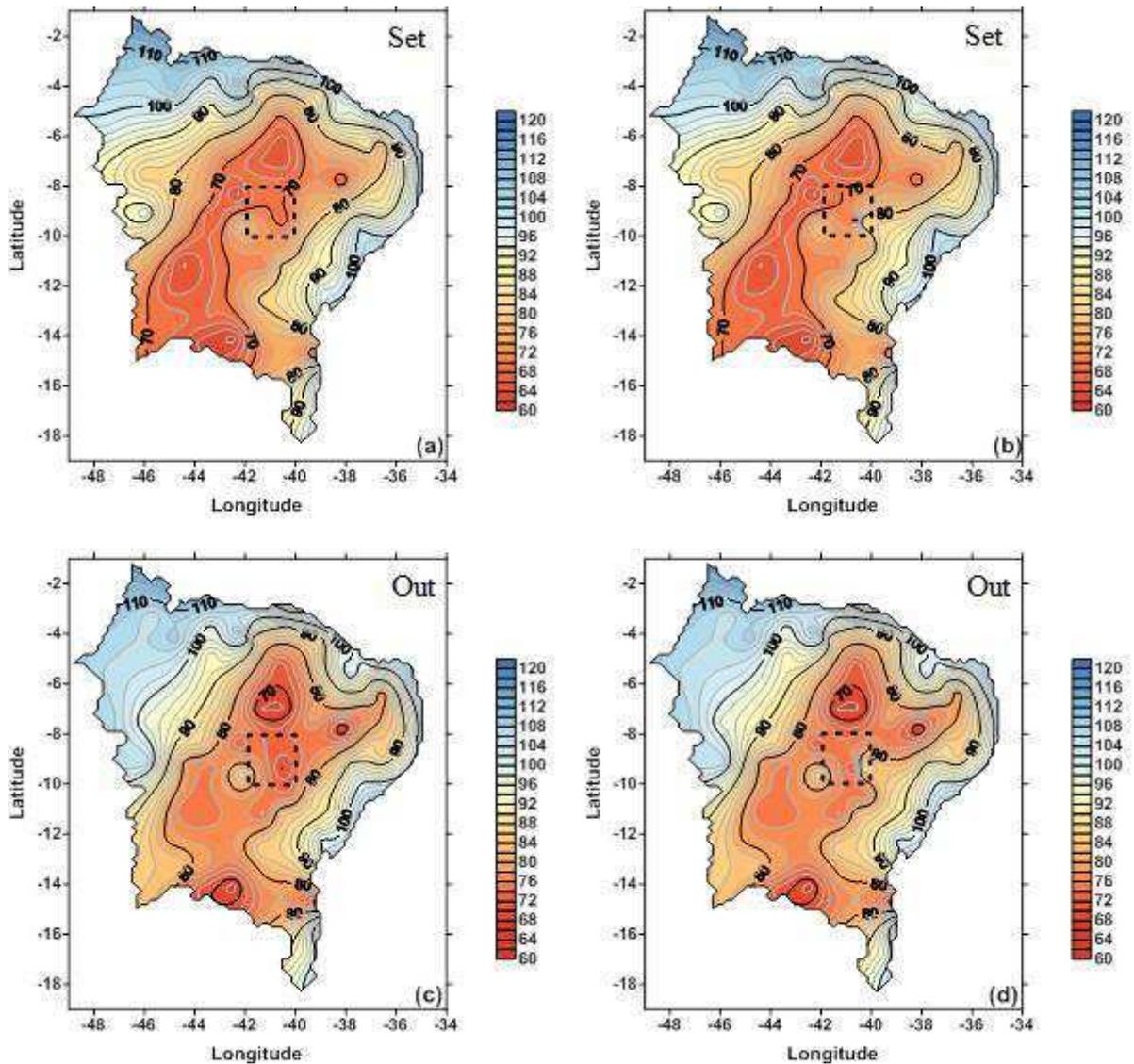


Figura 23. Configuração espacial da componente úmida de refratividade (N_u) para os meses de setembro e outubro da série das normais climatológicas de 1981-2010: (a) e (c) sem a inclusão de Bebedouro e Mandacaru; (b) e (d) com a inclusão de Bebedouro e Mandacaru, a área delimitada pelo quadrado tracejado com coloração preto representa a região de estudo (equivalendo de 8 a 10 ° S e 40 a 42 ° W).

A utilização da nova série de dados das normais climatológicas (1981-2010) permitiu avaliar a influência de alterações na região de Bebedouro-PE e Mandacaru-BA, na refratividade (N_u). Observam-se alterações substanciais na distribuição espacial de N_u com a inclusão dos dados de Bebedouro e mandacaru. O aumento na área dos núcleos de valores máximos é visível. Na comparação entre as Figuras 22.b (janeiro) e 22.d (fevereiro) observa-se que no mês de janeiro os valores de N_u são mais altos. Sem os dados de Bebedouro-PE e Mandacaru-BA não existem núcleos de valores máximos (Fig. 22.a e 22.c). Esse resultado

reflete o aumento da umidade decorrente das áreas agrícolas e expansão dos perímetros irrigados.

Para os meses de setembro e outubro figura 23.b e 23.c constam novamente que os dados observados em Bebedouro-PE e Mandacaru-BA apresenta um aumento na refratividade (Nu), alterando substancialmente os valores do Nu. Sem a inclusão dos dados de Bebedouro e Mandacaru (Fig. 23.a e 23.c) os valores de Nu são bem mais baixos na área de estudo. Então o aumento da umidade resultante do processo de evapotranspiração na região dos perímetros irrigados altera o padrão espacial da componente úmida de refratividade. Esse aumento da refratividade pode gerar condições anômalas de propagação de ondas radioelétricas e causar degradação dos sinais em transferências de dados ou nos diferentes meios de comunicações, tais como nos sistemas de telefonia e sistemas de segurança em aeroportos, afetando de modo geral a sociedade e o sistema econômico da região.

As análises das figuras 20, 21, 22 e 23 com o uso dos dados das duas séries das normais climatológicas de 1961-1990 e 1981-2010 que correspondem a 50 anos de dados observados, permitiram verificar que independente do período úmido ou seco na área de estudo a influência ocasionada pelas mudanças antrópicas, no período pós-construção do lago de Sobradinho influencia diretamente no comportamento da refratividade (Nu). A implantação dos perímetros irrigados e expansão agrícola aumentaram o teor de umidade presente nessas áreas. Essa mudança é mais nítida nos meses do período seco (setembro e outubro), pois aumenta a taxa de evaporação e transpiração.

6. CONCLUSÕES

As análises desenvolvidas permitiram concluir que:

A variação média mensal da componente úmida de refratividade (Nu) na região semiárida tem comportamento semelhante ao da umidade relativa do ar e precipitação. Este resultado indica uma correlação positiva entre estas variáveis e um ciclo sazonal bem definido com valores mais altos de Nu no período úmido e valores mais baixos no período de estiagem;

Valores dos coeficientes de determinação obtidos na análise de regressão linear simples entre as variáveis Nu e r (g/kg) da ordem de 0,67 para alguns meses em Petrolina no período 1995-2014 e de 0,40 em Bebedouro (PE) de Mandacaru (BA) no período de 1975-1994, indicam que a variável temperatura do ar, não considerada na análise, pode ter influência significativa no comportamento da Nu em áreas com influências antrópicas e, portanto devem ser incluída em estudos de rádio climatologia;

Os resultados da ANOVA permitiram detectar localidades cujas mudanças na umidade do ar e na componente úmida da refratividade mensal para Petrolina, Bebedouro e Mandacaru foram consideradas significativas do ponto de vista estatístico;

Valores mais altos da componente úmida de refratividade (Nu) detectados nas localidades de Bebedouro-PE e Mandacaru-BA, quando comparados aos valores obtidos com dados de Petrolina PE, indicam que mudanças ambientais no entorno de centros urbanos são importantes em estudos de radiocomunicação;

A alta frequência de valores negativos do gradiente vertical de refratividade na estação chuvosa e seca durante o período analisado implica que a região de estudo é predominantemente super-refrativa.;

O aumento substancial da componente Nu em Mandacaru-BA quando comparado aos valores obtidos em Bebedouro-PE tem relação com mudanças ambientais decorrentes da expansão agrícola;

O maior percentual de dutos de superfície observados em anos mais secos indica aumento da evapotranspiração decorrentes de maior déficit de vapor na troposfera;

Verificou-se um aumento da área vegetada entre 1993 e 2007 tanto na região de Bebedouro quanto na região de Mandacaru. No entanto, o aumento foi bem mais expressivo na área de Mandacaru-BA;

Os núcleos da componente úmida de refratividade com valores máximos na região de Bebedouro e Mandacaru representam um resultado importante desse estudo. Indica a geração de um microclima na região resultante de ações antrópicas;

A mudança no padrão de comportamento de Nu, decorrente da expansão agrícola requer maior atenção em planejamentos de projetos de radiocomunicação e/ou utilização de equipamentos que operam na faixa de micro-ondas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.; BASTIAANSEN, W.; Waters, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Surface energy balance algorithms for land (SEBAL)**, Idaho implementation – Advanced training and user’s manual, version 1.0, 97p. 2002.
- ALVES, J. M. B. **Um vórtice ciclônico de altos níveis sobre o nordeste do Brasil e Atlântico adjacente no verão de 1999**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 16, n. 1, p. 115-122, 2001.
- AMORIM, M. J. R.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F. **Incidência de dutos troposféricos no período do EMAS**. In: X Congresso Brasileiro de Meteorologia e VIII Congresso da FLISMET, 1998, Brasília-DF. Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia e VIII Congresso da FLISMET. 1998.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Atlas Irrigação: **Uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017. 86 p.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Rio São Francisco / Agência Nacional de Águas, **Superintendência de Usos Múltiplos**. Brasília, 2007.
- ARAÚJO, G. J. F.; SILVA, M. M. Crescimento econômico no semiárido brasileiro: o caso do polo frutícola Petrolina/Juazeiro. *Caminhos de Geografia*, 14(46), 2013.
- AJILEYE, O-O. Dependence of Surface Refractivity Gradient Variation on Precipitation in the Tropical West Africa. **Journal of Applied Physics**. V. 8, p. 57-65, 2016.
- BEAN, B. R.; DUTTON, E. J. Radio Meteorology. **Dover Publications**, Inc., New York, 435p. 1968.
- BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. da; BEZERRA, B. B. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.709-717, 2011.
- CABRAL JÚNIOR, J.B., SILVA, C.M.S., DE ALMEIDA, H.A. et al. Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil’s semiarid region. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-11, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02816-w>

CHAVES FILHO, J. B, CORREIA, M. F., GURJÃO, C. D. S.; BARBIERE, L. F. P.; SILVA ARAGÃO, M. R. Formação de Dutos Troposféricos no Semiárido Brasileiro: Um Estudo de Caso em Condições Meteorológicas Extremas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, V. 6, p. 932-994, 2013.

CORREIA, M. F. Impacto das Ações Antrópicas no Clima do Submédio do Rio São Francisco: Um Estudo Numérico e Observacional. 2001. **Tese de doutorado**. IAG- USP. São Paulo.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. Soil Occupation and Atmospheric Variations over Sobradinho Lake area. Part Two: A regional modeling study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 94, p. 115-128, 2006. DOI 10.1007/s00703-0050174-3.

CORREIA, M. F., BEZERRA, J. C., BARBIERI, L., SILVA ARAGÃO, M. R., Gonçalves, W. Mudanças no uso do solo e variações no padrão de refatividade atmosférica: Uma análise numérica e observacional na área do polo de irrigação Petrolina/Juazeiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 6, 919-931. 2013.

CORREIA, M F; SILVA ARAGÃO, M. R.; PENAFORTE, A. G.; MEDEIROS, R. L. B. Characteristics of Atmospheric Surface Ducts in the Brazilian Semiarid. **Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ. IMPRESSO)**, v. 41, p. 375-381, 2018.

COUTINHO, M. D. L., SILVA COSTA, M. da, SANTOS GOMES, A. C. dos, MORAIS, M. D. C. de, JACINTO, L. V., LIMA, K. C., SAKAMOTO, M. S. Estudo de caso: evento meteorológico no Nordeste do Brasil entre os dias 03 e 04 de Janeiro de 2015. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20. 2017.

FRANCO, M.M.F.; MUNIZ, J.; NOVAS, M.F.B. Geotecnologia aplicada na análise temporal de índice de vegetação do Parque Estadual da Serra da Tiririca. **In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba**. Abril/2011. P. 1942.

IBGE. Contagem da população 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/default.shtm>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Library of Congress Cataloging in Publication Data. Canada: **Academic Press**, 1983. 408p.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper Tropospheric Cyclone Vortices in the Tropical South Atlantic. **Tellus**, 33, p. 538 - 550. 1981.

LERSCH, Rodrigo Pereira. "Integração de técnicas de SIG e sensoriamento remoto na classificação de imagens digitais através do uso da teoria da evidência." 2003.

LIMA JUNIOR, Almir Wirth. Formação e aperfeiçoamento profissional em Telecomunicações & Redes de Computadores. Rio de Janeiro; **Axcel Books**, 2003.

LYRA, M. J. A., CAVALCANTE, L. C. V., LEVIT, V., FEDEROVA, N. Ligação Entre Extremidade Frontal e Zona de Convergência Intertropical Sobre a Região Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, 42(1), 413-424. 2019.

MAHFOUF, J. F.; RICHARD, E.; MASCART, P. The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulations. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 26, p. 1483-1553, 1987

MARKHAM, B.L.; BARKER, L.L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.3, p.517-523. 1987.

NOGUEIRA, V.F.B. Expansão da soja no cerrado maranhense: uma análise da influência antrópica no clima regional. **Tese (Doutorado em Meteorologia)**. Universidade Federal de Campina Grande, 145f, Campina Grande, PB, 2015.

PATEL, S. R., Refractive Index Spectral Transfer in Inhomogeneous Turbulence in Atmospheric/Oceanic Surface Layer. 11th conference on Satellite Meteorology and Oceanography, **AMS, Madison**, WI. U. S. A. 15-18 October 2001.

PENAFORTE, A.G.; CORREIA, M.F. Uma Análise da Relação entre Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis e Formação de Dutos Atmosféricos de Superfície na Área do Aeroporto de Petrolina-PE. In: **Congresso de Iniciação Científica** da UFCG, Campina Grande, 2017.

PENAFORTE, A.G., CORREIA, M.F., SILVA ARAGÃO, M.R., ANDRADE, A. S. "Influência de Condições Meteorológicas Locais na Formação de Dutos Atmosféricos em Petrolina (PE) e Natal (RN)." XV CBMET: **Anais**. Maceió, Alagoas. 2018.

REIS, Jean Souza dos. Características dinâmicas e termodinâmicas dos vórtices ciclônicos de altos níveis no Nordeste do Brasil. **Dissertação de Mestrado**. 2018.

- ROZA, R. H. Produção e disseminação de informação nas organizações: o papel da tecnologia da informação e a geração de conhecimento. 2006. 105p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Informação) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Pós-Graduação em Ciência da Informação, Campinas, 2006.
- SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B. Análise dos Índices de Extremos para o Semi-árido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, p.303-312, 2007.
- SHI, Y., K. YANG, Y. YANG, and Y. Ma Experimental verification of effect of horizontal inhomogeneity of evaporation duct on electromagnetic wave propagation, **Chin. Phys. B**, 24(4), 044,102. 2015a.
- SHI, Y., K. YANG, Y. YANG, and Y. Ma, Influence of obstacle on electromagnetic wave propagation in evaporation duct with experiment verification, **Chin. Phys. B**, 24(5), 323–328. 2015b
- SILVA, P. C. G., MOURA, M. S. B. de, KIILL, L. H. P., BRITO, L. D. L., PEREIRA, L. A., Sá, I. B., GUIMARÃES FILHO, C. Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. Embrapa Semiárido-**Capítulo em livro científico**. 2010.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p.243-252, 2005.
- SILVA, C. B., OLIVEIRA, L. F. C. de. Relação intensidade-duração-frequência de chuvas extremas na região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.20. 2017.
- SOUSA, Leandro Fontes, et al. "Dutos troposféricos e a estrutura da camada limite planetária na região de Petrolina. **Ciência e Natura** v.38, p.318-324. 2016.
- TASUMI, M. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. Idaho: University of Idaho, PhD thesis. 378p. 2003.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 8, 127–150. 1979.

UVO, C.R.B., A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua Relação com a Precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro. **Dissertação de Mestrado** em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. p.82 1989

8. ANEXO A

Nesta seção são apresentadas as figuras do diagrama de dispersão da razão de mistura (g/kg) e da componente úmida de refratividade (Unidades de refratividade) para os demais meses do período de análise.

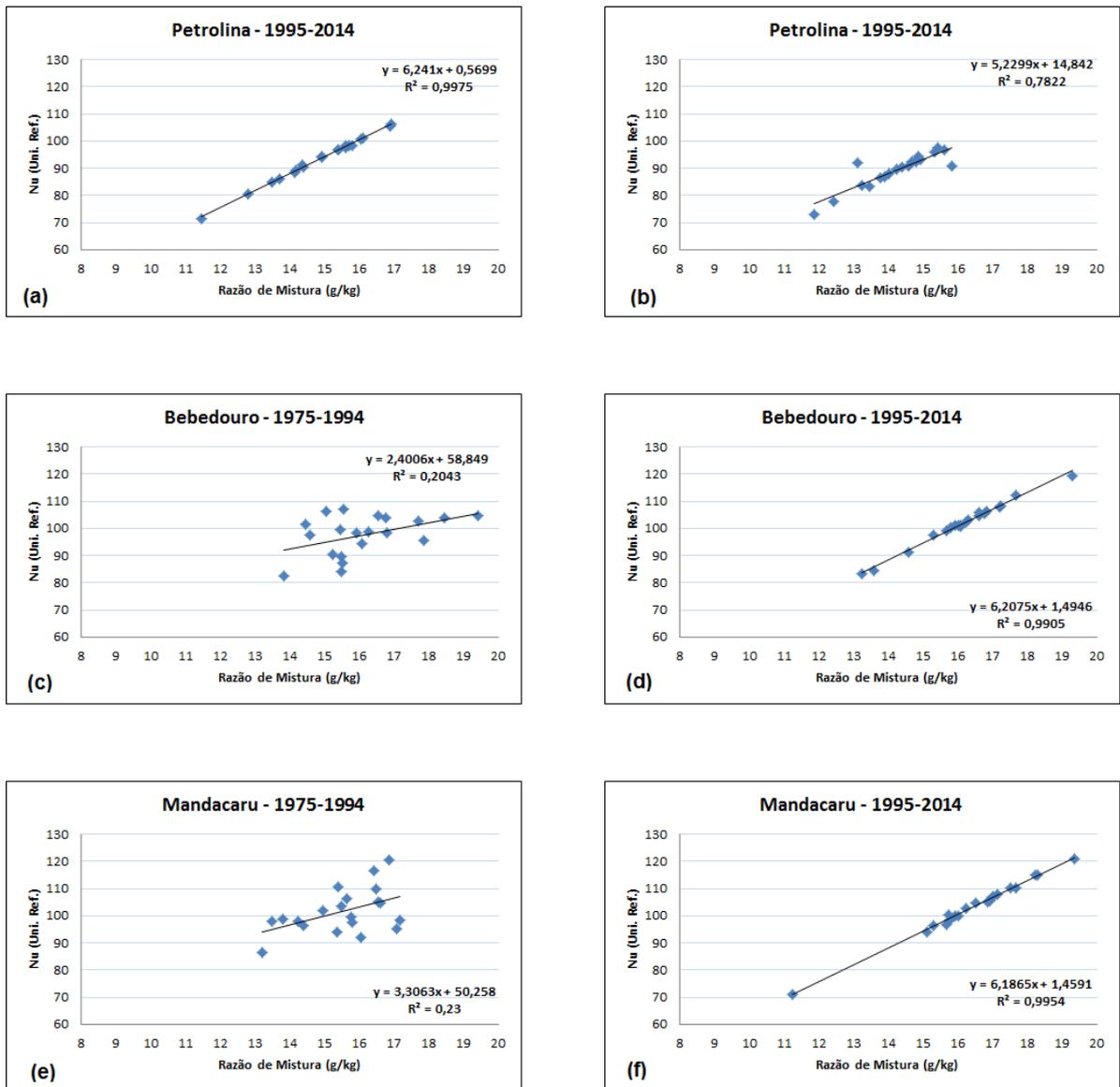


Figura 24. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de março nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

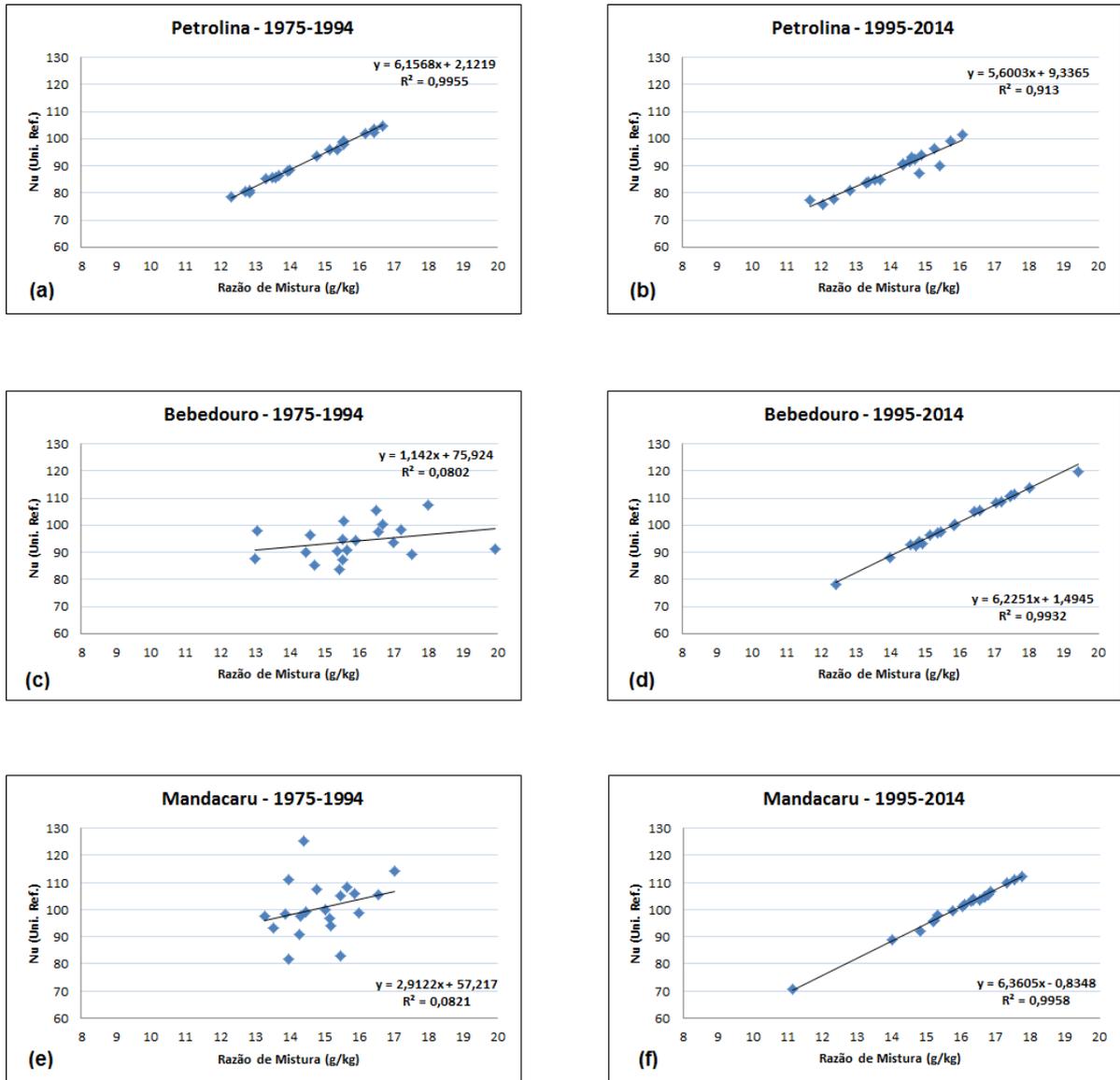


Figura 25. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de abril nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

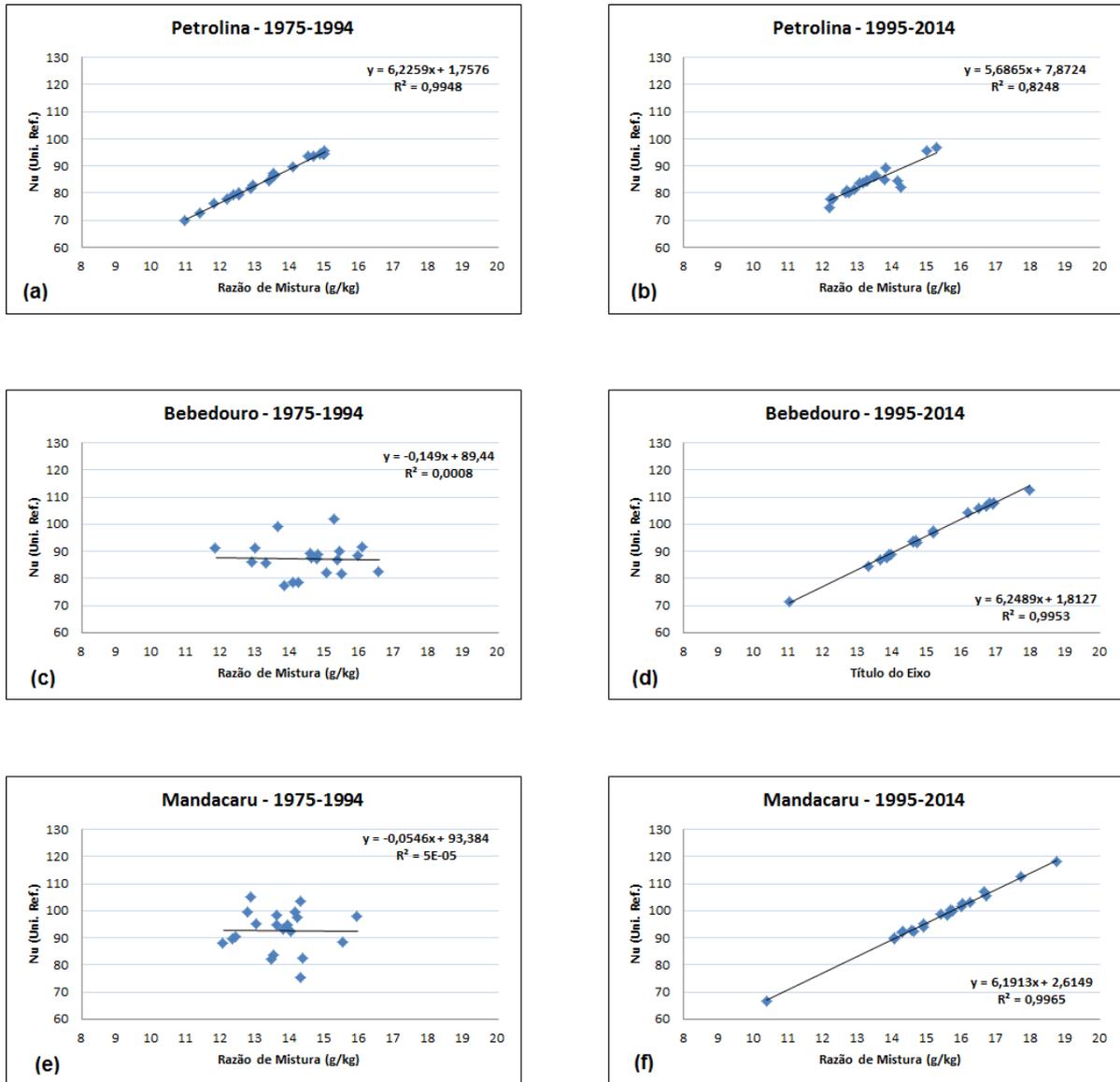


Figura 26. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de maio nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

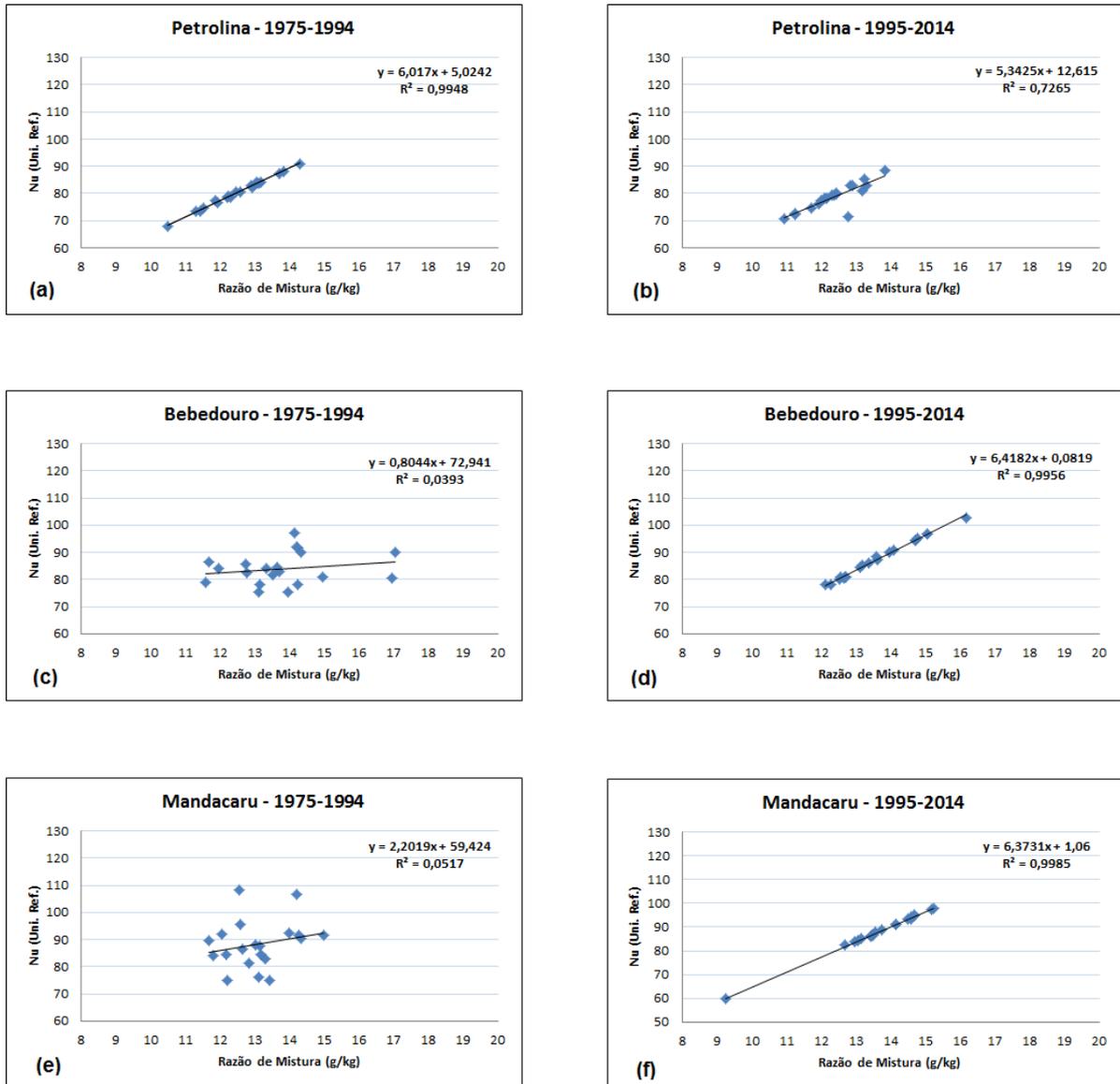


Figura 27. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de junho nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

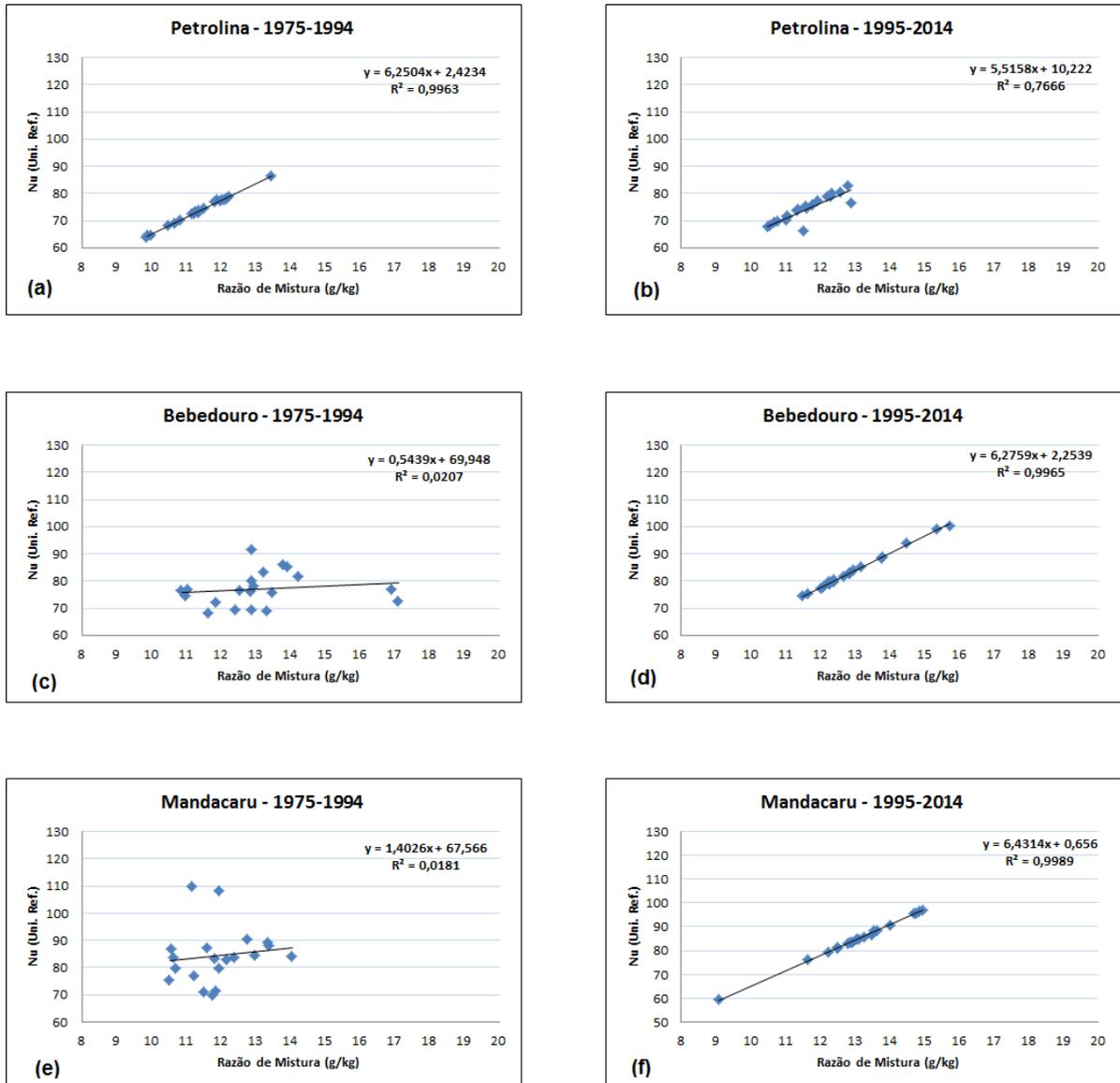


Figura 28. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e ‘Nu’ para o mês de julho nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

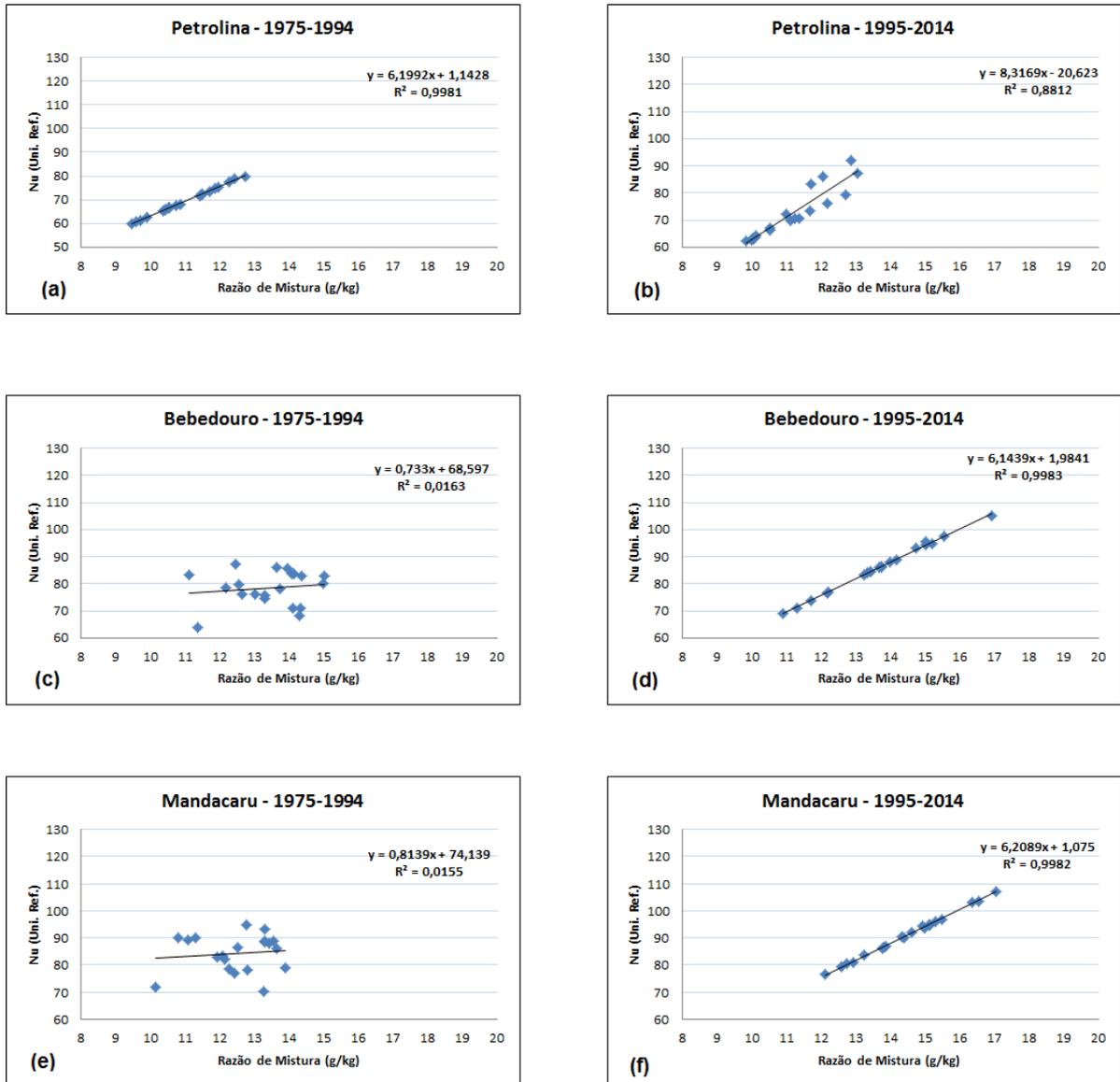


Figura 29. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de outubro nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

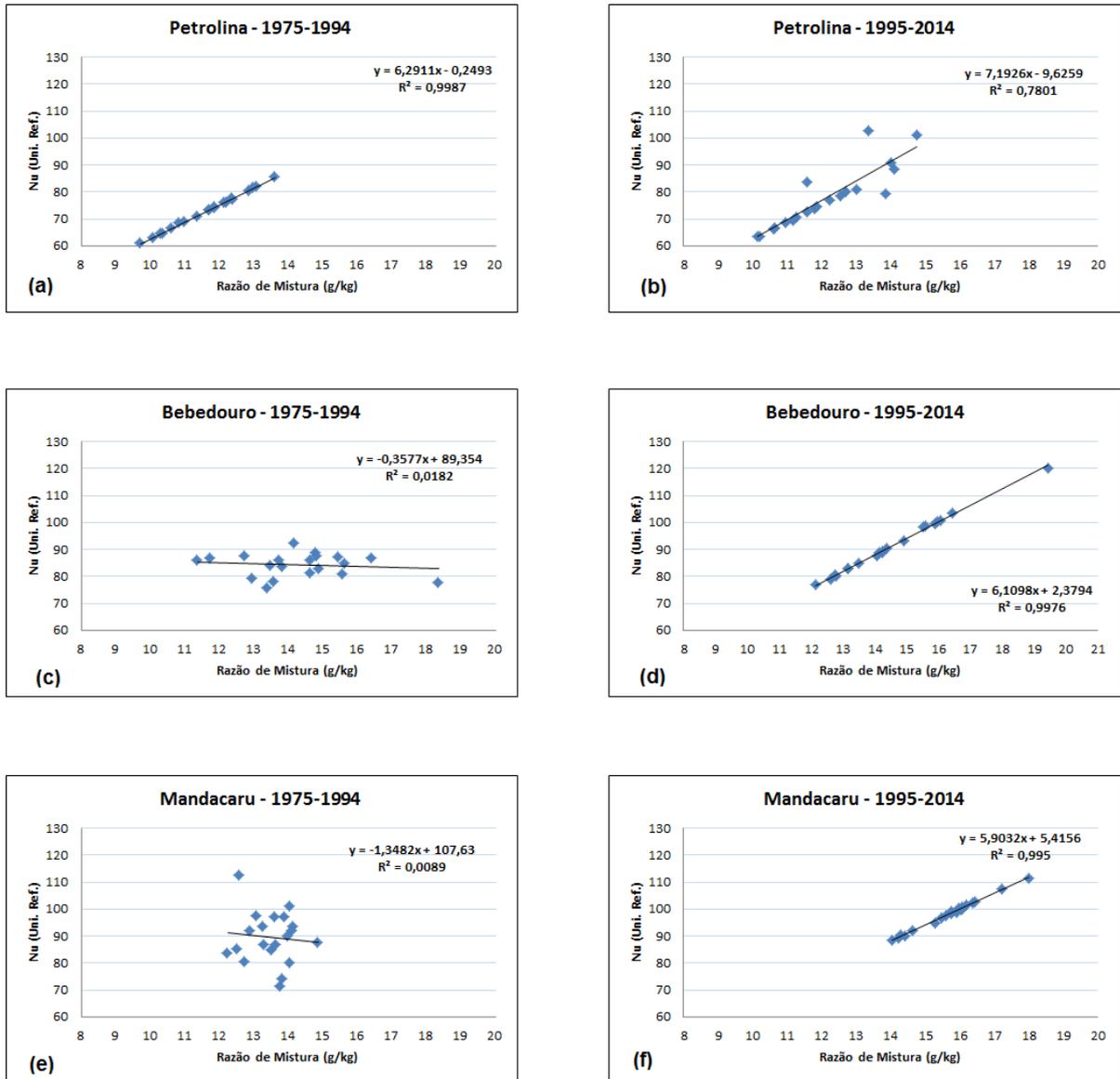


Figura 30. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de novembro nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).

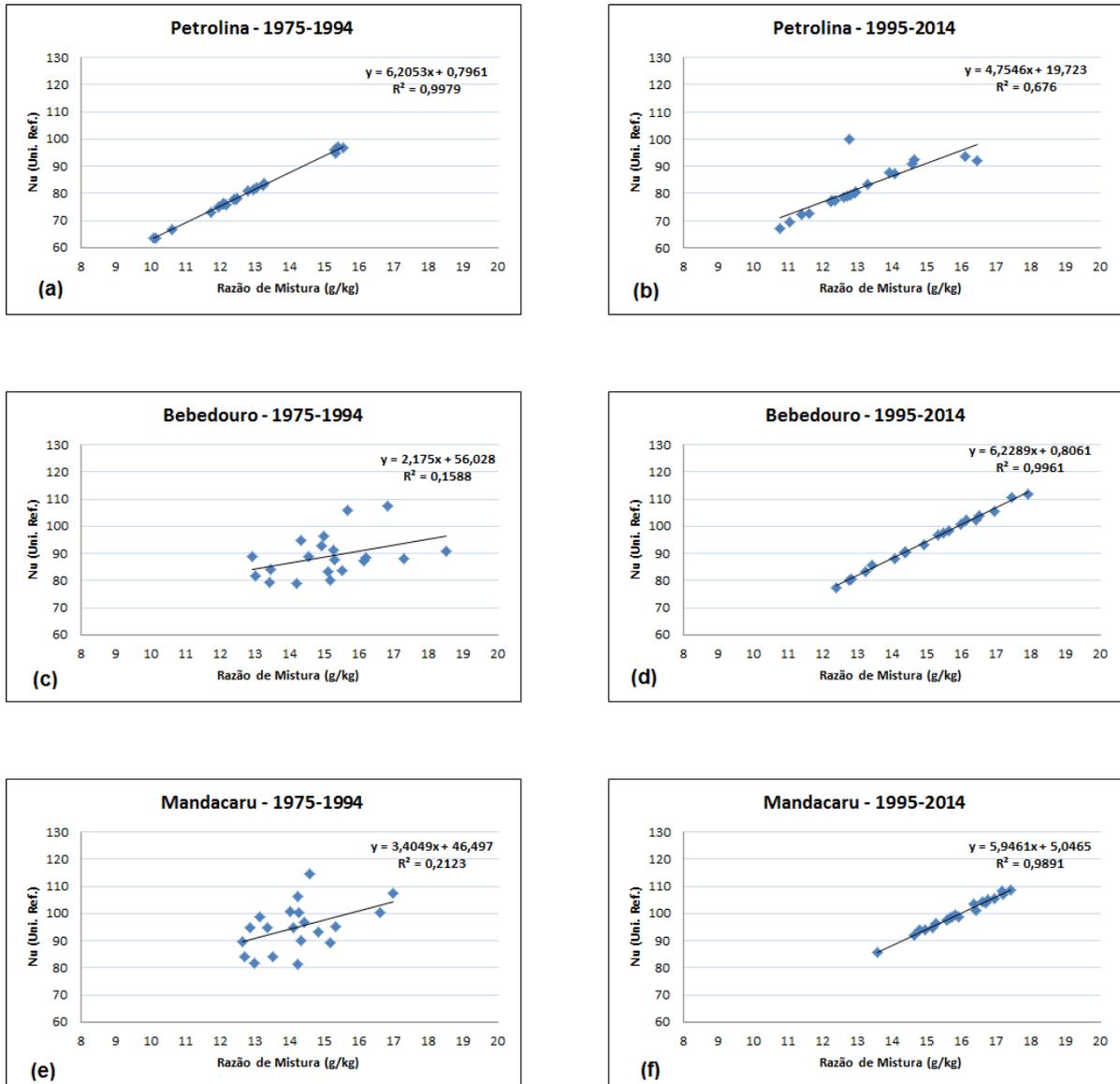


Figura 31. Diagrama de Dispersão entre r (g/Kg) e 'Nu' para o mês de dezembro nos períodos de 1975-1994: (a) Petrolina (PE), (c) Bebedouro (PE) e (d) Mandacaru (BA), e 1995-2014: (b) Petrolina (PE), (d) Bebedouro (PE) e (f) Mandacaru (BA).