

RAYANNE OLIVEIRA TEIXEIRA

**NDVI E SUA RELAÇÃO COM PRODUTIVIDADE E ESTADO
NUTRICIONAL DA CULTURA DA PALMA DE ÓLEO NO ESTADO DO
PARÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Solos e
Nutrição de Plantas, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

T266n Teixeira, Rayanne Oliveira, 1990-

2018 NDVI e sua relação com produtividade e estado nutricional
da cultura da palma de óleo no Estado do Pará / Rayanne
Oliveira Teixeira. – Viçosa, MG, 2018.
viii, 34 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Júlio César Lima Neves.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 32-34.

1. Dendezeiro. 2. Produtividade agrícola. 3. Vegetação -
Mapeamento. 4. Plantas - Nutrição. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em
Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

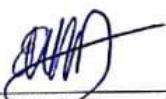
CDD 22. ed. 633.851

RAYANNE OLIVEIRA TEIXEIRA

**NDVI E SUA RELAÇÃO COM PRODUTIVIDADE E ESTADO NUTRICIONAL
DA CULTURA DA PALMA DE ÓLEO NO ESTADO DO PARÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 20 de fevereiro de 2018.



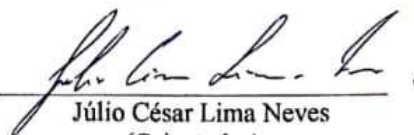
Elpídio Inácio Fernandes Filho
(Coorientador)



Ricardo Salles Tinôco



Sérgio Yoshimitsu Motoike



Júlio César Lima Neves
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as oportunidades que me concede, força e proteção.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade de realização do curso.

À Empresa Agropalma, por financiar a pesquisa e disponibilizar o banco de dados, tornando possível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Júlio César Lima Neves, pelas oportunidades, paciência, ensinamentos e por me apresentar essa linha de pesquisa.

Ao meu coorientador, professor Elpídio Inácio Fernandes Filho, pelo auxílio imprescindível, paciência e ensinamentos que me desperta cada vez mais o interesse nesta linha de pesquisa.

Ao Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Solos (LabGeo) que foi fundamental para o processamento e análise dos dados e a todos os colegas do LabGeo, pela acolhida e partilha de conhecimento.

Aos professores do Departamento de Solos por todos os ensinamentos adquiridos nas disciplinas

Aos funcionários do Departamento de Solos, sempre dispostos a nos ajudar.

Aos meus amigos que desde o início me acompanham nesta jornada e a todos os colegas da pós-graduação.

À todos que contribuíram com essa importante etapa da minha vida.

Muito obrigada!

BIOGRAFIA

RAYANNE OLIVEIRA TEIXEIRA, filha de Rossivaldo Pereira Teixeira e Eliene Oliveira Teixeira, nasceu em Tucuruí, Pará, em 25 de julho de 1990.

Cursou ensino médio no colégio Sophos, localizado em Tucuruí. Concluiu o ensino médio em dezembro de 2008.

Graduou-se em Engenharia Florestal no ano de 2015, pela Universidade Federal Rural da Amazônia.

Em 2016 ingressou na Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em nível mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, junto ao Departamento de Solos, na área de Fertilidade do Solo, com ênfase em “Manejo de Agrossistemas”.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	4
3.1. Caracterização da Área de Estudo e Organização do Banco de Dados	4
3.2. Elaboração de Mapas de Produtividade	6
3.3. Modelos Preditivos da Produtividade	6
3.5. Delimitação da Área de Plantio e Processamento das Imagens Espectrais	8
3.6. Processamento do Banco de Dados e Cálculo do NDVI	9
3.7. Relacionamento do NDVI com produtividade e com os teores foliares de nutrientes	9
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
4.1. Série temporal da Sazonalidade da Produção	11
4.2. Predição da Produtividade	14
4.3. Mapas de Produtividade	17
4.4. Relacionamento da Produtividade com o NDVI	22
4.5. Relacionamento do NDVI com os Teores Foliares de Nutrientes	24
5. CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

RESUMO

TEIXEIRA, Rayanne Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **NDVI e sua relação com produtividade e estado nutricional da cultura da palma de óleo no Estado do Pará.** Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

A sustentabilidade de produção da cultura de palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq.), nas condições da Amazônia brasileira, é dependente do adequado manejo nutricional, que pode ser obtido com base na utilização de critérios diagnósticos, para embasar os programas de fertilização, a exemplo das faixas de suficiência de teores foliares de nutrientes. Essas faixas podem ser obtidas por métodos de diagnose tradicionalmente utilizados, tais como os índices balanceados de Kenworthy, como também mediante o relacionamento desses teores com o padrão de reflectância espectral da vegetação, abordagem esta não estudada para a cultura da palma de óleo nas condições de cultivo da Amazônia brasileira. Os objetivos deste trabalho são obter mapas de produtividade de cachos de frutos frescos (CFF) para sítios de produção representativos da região de Tailândia, nordeste do Pará, para períodos com pluviometria diferencial; avaliar a sazonalidade da produção de CFF dos materiais genéticos mais cultivados na área; obter modelo preditivo da produtividade de CFF na fase adulta com base na produtividade de plantios jovens; avaliar o relacionamento entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e os valores de produtividade de CFF e os teores foliares de nutrientes. O trabalho foi realizado de modo a abranger 40.000 ha de plantios de diferentes materiais genéticos da cultura de palma de óleo, no município de Tailândia, Pará. Utilizou-se banco de dados, de 14 anos agrícolas, com informações georreferenciadas de material genético, produtividade de CFF em base mensal, e resultados de análise foliar. As sequências temporais das imagens foram adquiridas do site USGS Earth Explorer NASA. A sazonalidade de produção de CFF foi estudada mediante séries temporais. Para a predição da produtividade na fase adulta a partir da produtividade dos plantios jovens foram utilizados os algoritmos Cubist, Random Forest, Regressão linear e Gradient Boosting Machine. Mediante o método da Chance Matemática Relativa (ChMR) fez-se o relacionamento da produtividade com o NDVI e do NDVI com os teores foliares de nutrientes. Concluiu-se que: a técnica de Séries

Temporais foi eficiente no estudo da sazonalidade de produção de palma de óleo; a sazonalidade de produção intraanual é distinta conforme o material genético de palma de óleo, e, para o Deli x Lamé se acentua com o aumento do período de déficit hídrico; a predição de produtividade em idades mais avançadas pode ser feita com base na produtividade de plantios jovens da cultura de palma de óleo, mediante redes neuronais artificiais, a exemplo do modelo Random Forest; a utilização do NDVI e do método da Chance Matemática Relativa (ChMR) possibilitam a obtenção de faixas de suficiência de teores foliares de nutrientes, concordantes com as obtidas por métodos tradicionais de diagnose, de modo a assistir o monitoramento do estado nutricional da cultura de palma de óleo.

ABSTRACT

TEIXEIRA, Rayane Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2018. **NDVI and its relationship with productivity and nutritional status of the oil palm crop in the state of Pará.** Adviser: Júlio César Lima Neves. Co-adviser: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

The sustainability of production of oil palm (*Elaeis guineenses* Jacq), under the conditions of the Brazilian Amazon is dependent on the adequate nutritional management, which can be obtained based on the use of diagnostic criteria to support the fertilization programs, for example of nutrient foliar content levels. These bands can be obtained by diagnostic methods traditionally used, such as the Kenworthy balanced indexes, but also by their relationship with the spectral reflectance pattern of the vegetation, an approach that is not studied for the oil palm crop under the conditions of cultivation of the Brazilian Amazon. The objectives of this work were to obtain fresh fruit bunches (FFB) maps for production sites representative of the region of Tailândia, northeast of Pará, for periods with differential rainfall; to evaluate the seasonality of FFB production of the most cultivated genetic material in the area; to obtain a predictive model of FFB productivity in the adult phase based on the productivity of young plantations; to evaluate the relationship between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the FFB productivity values and foliar nutrient contents. The work was carried out to cover 40,000 ha of plantations of different genetic materials of the oil palm crop, in the city of Tailandia, Pará. A 14-year agricultural database was used with georeferenced information of genetic material, productivity of FFB on monthly basis, and leaf analysis results. The temporal sequences of the images were acquired from NASA USGS Earth Explorer website. The seasonality of FFB production was studied by time series. For the prediction of productivity in the adult phase from the productivity of the young plantations were used the algorithms Cubist, Random Forest, Linear Regression and Gradient Boosting Machine. Using the Relative Mathematical Chance (KMR) method, the productivity relationship with the NDVI and the NDVI was compared with the foliar nutrient contents. It was concluded that: the Time Series technique was efficient in the study of the seasonality of palm oil production; the seasonality of intra-annual production is distinct according to the oil palm genetic

material, and for Deli x Lamé it is accentuated by the increase in the period of water deficit; the prediction of productivity at more advanced ages can be made based on the productivity of young plantations of the oil palm crop, through artificial neural networks, such as the Random Forest model; the use of NDVI and the Relative Chance method (ChMR) make it possible to obtain ranges of nutrient foliar contents, in agreement with those obtained by traditional methods of diagnosis, in order to assist the monitoring of the nutritional status of the palm crop of oil.

1. INTRODUÇÃO

A palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq), também conhecida como dendezeiro (dendê), é uma palmeira nativa da África Ocidental e uma das culturas que mais se expande nos trópicos (COMTE et al., 2012). Parte dessa expansão ocorreu no Sudeste Asiático, mais precisamente na Malásia e Indonésia que expandiram suas plantações e triplicaram a produção nos últimos 15 anos; esses dois países atualmente dominam o mercado, com 85% da produção global (THOUMI, 2018).

No Brasil é cultivada desde o século XVII, inicialmente os plantios ocorreram na Bahia e posteriormente expandiram-se para alguns estados da Amazônia, onde se encontram as maiores áreas cultivadas, sendo o Pará o maior produtor de óleo de palma do Brasil, responsável por mais de 90% da área plantada, principalmente na região do Nordeste Paraense (ALVES et al., 2013; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE PALMA DE ÓLEO – ABRAPALMA, 2016).

Os principais produtos do dendê são dois tipos de óleos: o óleo de palma, conhecido internacionalmente por *palm oil*, cujo produto é extraído diretamente da polpa e com destino principal para indústria alimentícia, e o óleo de palmiste, retirado da amêndoa do fruto, e utilizado na composição de cosméticos e fabricação de lubrificantes (POTTER, 2015; SILVA, 2006).

Essa diversidade de uso aliada a outras características importantes para o mercado torna o óleo de palma o mais comercializado no mundo (CORLEY & TINKER, 2015). A cultura da palma de óleo destaca-se também como a oleaginosa mais produtiva, com rendimento médio de 3 a 5 t/ha/ano de óleo, apresentando maior produção por unidade de área quando comparado a outras culturas oleaginosas, como a soja, por exemplo (MURPHY, 2003; PARENTE, 2003).

A cultura apresenta ciclo econômico produtivo de 25 anos, com produção de frutos a partir do terceiro ano e adapta-se bem a diversos tipos de solos, com desenvolvimento satisfatório nas faixas de pH de 4 a 6, constituindo uma excelente opção agrícola para a Amazônia (ROCHA & CASTRO, 2012).

Para obter uma ótima produção agroindustrial é preciso manter a produção de cachos de frutos frescos (CFF) ao longo do ano. Todavia, diversos fatores interferem na oscilação do rendimento como as condições climáticas, material genético e o manejo aplicado.

A palma de óleo possui algumas exigências climáticas, como um período de 1.500 a 2.000 horas anuais de luminosidade solar, e quanto mais homogêneo essa distribuição da radiação solar, melhor para a cultura expressar sua elevada capacidade fotossintética (CORLEY & TINKER, 2003), sendo determinante na sazonalidade de produção de CFF. Além da insolação, é importante haver temperatura média anual em torno de 24°C, com variações entre 25°C e 28°C, e umidade relativa do ar superior a 70%. As variações de temperatura influenciam diretamente na emissão de folhas e, conseqüentemente, no número de cachos por unidade produtiva, refletindo também no teor médio de óleo dos frutos. Trabalhos realizados na Malásia mostram os efeitos dos fatores climáticos no período de floração impactando de forma considerável a produção de frutos (CORLEY & TINKER, 2003; DITSCHAR et al., 2003).

Quando as características viabilidade e potencialidade de produção da palma de óleo são avaliadas, percebe-se estreita relação, e de grande magnitude, com a deficiência hídrica anual (mm); quanto maior o déficit hídrico, menores as produtividades de cachos e de óleo. No relatório de sustentabilidade da Empresa Agropalma (AGROPALMA, 2015) é destacada a importância de haver precipitação média de 2.000 a 2.500 mm/ano, com boa distribuição das chuvas. A oscilação da pluviosidade pode causar estresse hídrico, refletindo diretamente na redução do peso médio dos cachos, no tamanho e surgimento de novas folhas e no abortamento de inflorescências femininas, havendo, segundo esse relatório, considerável redução da produtividade de CFF com a ocorrência de déficit hídrico acima de 100 mm anuais.

Em condições normais de suprimento de água no solo, o plantio na fase jovem emite em média duas inflorescências por mês, predominando flores femininas. Em caso de ocorrência de déficit hídrico acentuado, ocorre estímulo à formação de inflorescências masculinas, acarretando menor produção de cachos (GOMES JUNIOR & BARRA, 2010; MORAES & BASTOS, 1972).

Essa variação pluviométrica reflete na exigência e no estado nutricional da planta. Na cultura, faz-se intensa e sistemática utilização da análise foliar, no contexto do monitoramento nutricional, havendo, atualmente, valores de referência para a cultura do dendê para as condições da Amazônia brasileira (GUZMÁN, 2014; MATOS et al., 2016; NEVES, 2017*), visando a avaliação do aspecto quantitativo (o grau de

* Prof. Júlio César Lima Neves DPS/UFV (comunicação pessoal)

balanço, por meio dos índices balanceados de Kenworthy – índices KW) e do aspecto qualitativo (o grau de equilíbrio, por meio dos índices DRIS) do estado nutricional da cultura.

A coloração das folhas relaciona-se com a refletância da vegetação, conforme padrão espectral característico da espécie vegetal. Nesse contexto, o sensoriamento remoto pode ser utilizado de modo a assistir o monitoramento e o diagnóstico do estado nutricional das plantas, durante o ciclo de produção. Técnicas de sensoriamento remoto estão sendo utilizadas na agricultura para obter vários índices de vegetação como indicadores de biomassa, do estado nutricional e da produtividade das culturas. (REZNICK, 2017).

Dentre os índices de vegetação o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ou seja, o Índice da Vegetação por Diferença Normalizada) tem sido um dos mais utilizados. O NDVI está baseado na alta absorção da clorofila que é constatada na região espectral do vermelho e na alta refletância na região do infravermelho próximo.

Nesse contexto, as aplicações de técnicas de sensoriamento remoto contribuem de forma rápida, eficaz e viável economicamente para monitorar diversas situações dos plantios, como a classificação e estimativa de áreas, discriminação das variedades, estimativa de produtividade, entre outras informações que podem ser obtidas através da avaliação do comportamento espectral das culturas agrícolas (JENSEN, 2009; PONZONI & SHIMABUKURO, 2007).

Para a cultura da palma de óleo há carência de estudos visando a utilização do sensoriamento remoto, notadamente quanto ao monitoramento nutricional. Para essa cultura, o relacionamento, mediante técnicas de análise numérica, de índices da vegetação obtidos de imagens espectrais com a produtividade, bem como com os teores foliares de nutrientes, pode resultar na obtenção de um modelo preditivo da produtividade, e de modelo aplicável ao monitoramento nutricional da cultura. Para tanto, é interessante que as imagens espectrais considerem diferentes cenários já observados de clima, bem como os respectivos resultados de análises foliares e de produtividade.

2. OBJETIVOS

Elaborar mapas de produtividade de CFF de diferentes sítios cultivados com Palma de óleo, na região Nordeste do Pará, em diferentes condições de pluviometria;

Avaliar a sazonalidade da produtividade de CFF;

Obter modelo preditivo da produtividade de CFF de plantios adultos com base na produtividade em idades mais jovens;

Relacionar o NDVI com a produtividade de CFF;

Relacionar o NDVI com os teores foliares de nutrientes.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da Área de Estudo e Organização do Banco de Dados

A pesquisa foi desenvolvida a partir do banco de dados dos plantios de palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq.), cultivados em áreas de propriedade do Grupo Agropalma, localizada no município de Tailândia, Estado do Pará. A Empresa possui 107 mil hectares de terras, sendo 64 mil hectares destinados a reservas florestais e aproximadamente 42 mil hectares de plantios comerciais, representados por oito departamentos (Figura 1).

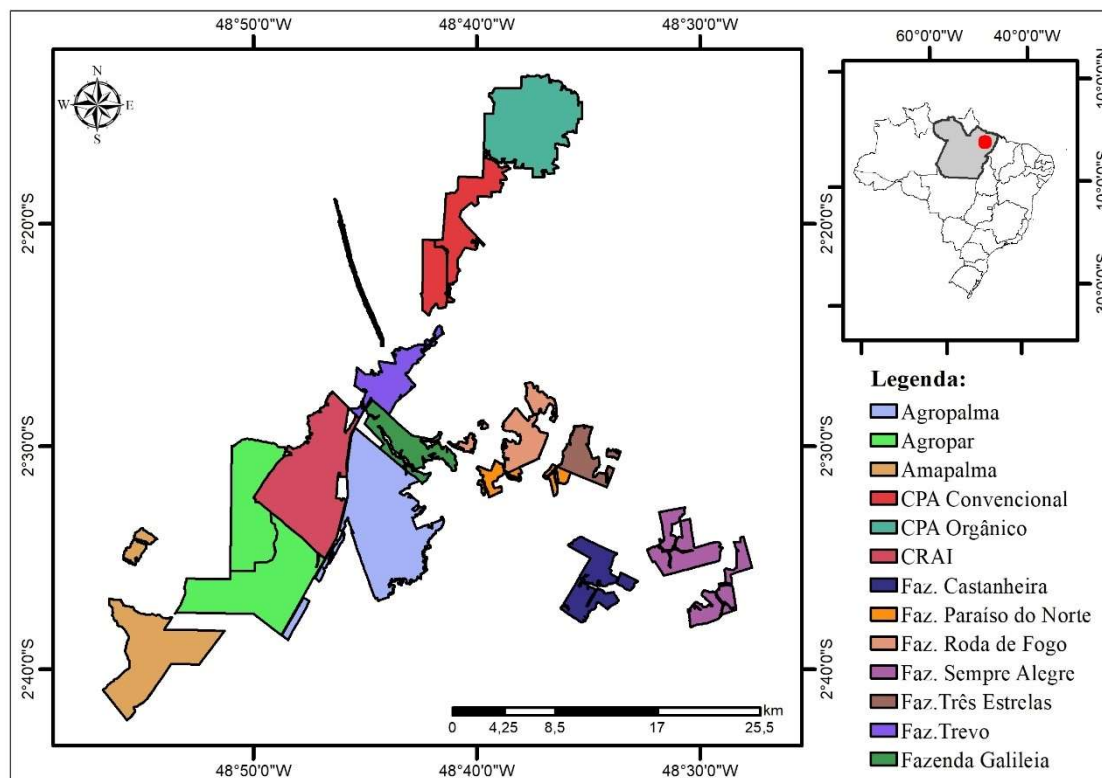


Figura 1: Mapa de localização dos departamentos da Empresa Agropalma.

Segundo a classificação de Köppen e Geiger o clima é considerado como Am. Tailândia tem um histórico de temperatura média de 27.0 °C., com média anual de pluviosidade de 2.399 mm (Fonte: <https://pt.climate-data.org/location/27683/>). Nas áreas da empresa, o mês mais seco tem uma diferença de precipitação 398 mm em relação ao mês mais chuvoso. Ao longo do ano as temperaturas médias variam 0.9 °C. A temperatura média do mês de setembro, o mês mais quente do ano, é de 27.3 °C. Ao longo do ano janeiro tem uma temperatura média de 26.4 °C. Durante o ano é a temperatura média mais baixa. O mês mais seco é agosto e tem 37 mm de precipitação. Apresentando uma média de 435 mm, o mês de fevereiro é o mês de maior precipitação

A altitude média da região é de 50 m, o material de origem é de sedimentos argilosos do Grupo Barreiras, as áreas são planas, sendo os solos dominantes nas áreas da empresa, os Argissolos Amarelos distrocoesos abrupticos, com dureza muito acentuada já no topo do horizonte B, que, entretanto, não se manifesta de forma mais clara em razão da elevada precipitação pluviométrica que mantém o solo úmido na maior parte de ano (KER & NEVES, 2010).

Atualmente estão plantados 17 materiais genéticos, a densidade de plantio nas parcelas são 131, 143 (a mais frequente) e 160 plantas/ha, com espaçamento de 7 a 7,8 m entre linhas e 9 m entre plantas.

O banco de dados foi organizado considerando a série anual de 2004 a 2017, em que foram selecionadas as seguintes informações: nome dos departamentos, identificação das parcelas de cada departamento, material genético, ano de plantio, ano da colheita, mês da colheita, área da parcela, produção de cachos de frutos frescos (CFF) por mês. Considerando a produção nos 12 meses, foi calculada a produtividade anual (CFF em t/ha/ano) de cada parcela monitorada.

Com todas as informações contidas no banco de dados, foi feito uma análise de consistência para eliminar dados discrepantes, parcelas sem identificações e áreas menores que um (1) hectare. Em seguida, foram criados comandos no programa estatístico R, que agrupavam todas as informações da mesma parcela e somavam os valores de produção de CFF (t/ha) de cada material genético para cada ano.

3.2 Elaboração de Mapas de Produtividade

Foram elaborados mapas de produtividade com auxílio do programa ArcGis 10.1. Do conjunto de registros constantes do banco de dados, foram selecionados aqueles correspondentes a cinco departamentos que permaneceram com o mesmo plantio durante os anos analisados e com a maior área plantada, são eles: Agropar, Agropalma, Amapalma, CPA orgânico e CRAI. Os mapas foram elaborados para os anos de 2005, 2007, 2011, 2013 e 2016, anos que refletem a maior e menor influência do déficit hídrico.

3.3 Modelos Preditivos da Produtividade

A modelagem da produtividade foi realizada com o auxílio do programa R e abrangeu a fase de treinamento e de validação.

Para a fase de treinamento foi utilizado 70% dos registros do banco de dados, que foram submetidos a quatro modelos: Random Forest, Cubist, Gradient Boosting Machine (GBM) e Regressão Linear.

As variáveis utilizadas como variáveis explicativas foram: departamento, material genético e os valores de produtividade das idades de 7, 8 e 9 anos para estimar a produtividade nas idades de 10 a 25 anos.

Os demais registros do banco de dados (30%) foram utilizados apenas na validação. Ao processar os dados com os modelos obtidos na fase de treinamento, sabe-se qual deles apresenta resultados mais próximos dos observados.

A avaliação dos modelos de predição foi realizada com base nos valores de R^2 e no erro quadrático médio (MAE), que consiste na diferença quadrática média entre o valor observado e o valor predito pelo modelo.

3.4 Avaliação da Sazonalidade de Produtividade Mediante Séries Temporais

Utilizando o programa estatístico R, procedimento Seasonal Decomposition of Time Series by Loess (STL), foram obtidos os padrões de sazonalidade da produtividade. O STL trata-se de um modelo paramétrico o qual usa um modelo aditivo e flexível para a série temporal, capaz de prever a avaliação da produção, que é a variação sazonal correspondente a variação ao longo do ano. A aplicação dessa técnica informa o que acontece com a produção quando há alguma mudança; como em uma época mais seca, por exemplo, a tendência muda, mas o sazonal praticamente não muda, o sazonal só sofrerá mudanças em situações extremas, em caso de intenso período de seca. Mas o que ocorre com mais frequência é o padrão repetir no tempo. Se não houver nenhuma perturbação, ele se mantém.

Este estudo foi realizado para os materiais Deli x Avros, Deli x Ekona e Deli x Lamé, em razão de apresentarem maior frequência de registros abrangendo os anos de 2004 a 2017, e com mais ampla gama de idades.

3.5 Delimitação da Área de Plantio e Processamento das Imagens Espectrais

Através da base cartográfica com a delimitação da área da empresa, visualizado no Google Earth, foi criado um shapefile no programa ArcGis10.1, com os shapefile de reserva legal (RL) e áreas de preservação permanente (APP) foram sobrepostas e diferenciadas das parcelas de plantios para não ocorrer influências no cálculo do índice de vegetação.

As sequências temporais das imagens foram adquiridas através do site do USGS Earth Explorer da NASA, com correções atmosféricas. Foram selecionadas imagens dos Satélites Landsat 5 – sensor TM (L5) e Landsat 8 – sensor OLI (L8), que possuem respectivamente 7 e 9 bandas espectrais, com resolução radiométrica de 8 e 16 bits, ambos com resolução espacial de 30 m, com exceção da banda 6 do L5 que corresponde a 120 m, estas bandas são do espectro visível – RGB, infravermelho próximo – IVP e infravermelho médio – IVM (PONZONI & SHIMABUKURO, 2007). A escolha pelo sensor da série L5 deu-se principalmente pela disponibilização gratuita das imagens e também devido ao fato de que as imagens L5 representam a maior e a mais antiga série de dados orbitais existentes. Disponibiliza imagens até o ano de 2012, a partir desse ano foram selecionadas imagens do L8.

Devido a presença de muitas nuvens na região, foi possível selecionar apenas uma imagem para cada ano, obtida para condições de baixa nebulosidade, o que foi feito para que fatores determinantes às respostas espectrais da vegetação não sofressem interferências advindas de questões naturais e consequentemente não interferissem nas análises. As imagens dos sensores TM e OLI correspondem a órbita 223/ponto 62. Para o cálculo dos índices de vegetação advindo do sensor TM, foram usadas as bandas 3 (Vermelho – 0,63µm a 0,69µm) e 4 (Infravermelho Próximo – 0,76µm a 0,90µm) e para o sensor OLI, foram usadas as bandas 4 (Vermelho – 0,64µm a 0,67µm) e 5 (Infravermelho Próximo – 0,85µm a 0,88µm).

Após adquirir todas as imagens, no programa ArcGis 10.1 elas foram cortadas de acordo com o tamanho da área de estudo e sempre projetadas para o sistema UTM/WGS84. Com as coordenadas de cada parcela, foram plotados os resultados de análise foliar e relacionados com as informações presentes na tabela de atributos do ArcGis.

3.6 Processamento do Banco de Dados e Cálculo do NDVI

Com os dados das bandas espectrais das imagens foi realizado o cálculo de extração do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), este índice tem grande aplicabilidade em estudos sobre cobertura vegetal, sendo amplamente utilizado em diferentes abordagens sobre estudos de culturas agrícolas, florestais e climáticas em diferentes escalas, foi proposto por Rouse et al. (1974) onde normalizaram a razão simples para o intervalo de -1 a +1. Para alvos terrestres o limite inferior torna-se aproximadamente zero (0) e o limite superior aproximadamente 0,80. A normalização foi feita através da Equação 1:

Equação 1:

$$\text{NDVI} = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)}$$

Onde: ρ_{IVP} – Refletância no infravermelho próximo

ρ_V – Refletância no vermelho

3.7 Relacionamento do NDVI com produtividade e com os teores foliares de nutrientes

Para o estudo do relacionamento do NDVI com a produtividade e com os teores foliares de nutrientes, inicialmente, para cada idade dos plantios na faixa de 10 a 25 anos, faixa em que havia maior número de registros no banco de dados (640 parcelas por ano de idade), os valores de produtividade de CFF (t/ha/ano) foram estratificados em quartis: Q1, Q2, Q3, Q4. Para os dados de produtividade de CFF do Q4, quartil que corresponde às maiores produtividades, calculou-se o percentil 75 (P75_Q4) em relação ao qual foi calculada a produtividade relativa para todos os talhões de cada idade, conforme a expressão Produtividade relativa (%) = (CFF (t/ha/ano) / P75_Q4 de CFF (t/ha/ano)) * 100). Aos valores de produtividade maiores que P75_Q4 atribuiu-se o valor de Produtividade relativa = 100%

O banco de dados assim obtido foi enriquecido com os dados de teores de macro e micronutrientes da folha 17 dos plantios com 10 a 25 anos de idade, correspondentes a cerca de 50% da área monitorada quanto à produtividade.

Os relacionamentos da produtividade em função do NDVI, bem como do NDVI em função dos teores foliares de nutrientes foi realizado mediante o uso do método da chance matemática relativa (CHMR).

O método CHMR, proposto por Fernandes (2010) é uma evolução do método da Chance matemática (CHM) proposto por Wadt et al. (1998). O método integra a frequência de lavouras de alta produtividade e a produtividades destas dentro de classe específica da variável tida como explicativa, baseando-se na esperança matemática e tendo como pressuposto o fato de que em grandes populações a frequência observada se aproxima da probabilidade; o maior valor de CHM assim obtido é tomado como 100% e os demais são proporcionalizados a esse.

Neste trabalho manteve-se toda a sequência lógica do método, que, porém, foi utilizado para relacionar, em sequência: 1) as produtividades relativas de CFF com o NDVI, de modo a se obter a classe de valores de NDVI que maximiza a CHM de se ter as produtividades relativas de CFF ($CFF_{Rel} > P70$ de CFF_{Rel}); 2) o NDVI com o teor foliar de cada nutriente, de modo a se obter a classe de teores que maximiza a CHM de se ter o NDVI na faixa de valores que maximiza $P70$ de CFF_{Rel} .

Para ambos os tipos de relacionamento, a CHM de cada classe foi dividida pelo maior valor da CHM, o resultado correspondendo à CHMR respectiva. Em seguida mediante equações de regressão, obtidas com o auxílio do programa Curve Expert, esses valores de CHMR foram relacionados ao ponto médio do NDVI de cada classe.

Com base nas equações assim ajustadas, para os dois tipos de relacionamento acima mencionados, foram obtidas as faixas de suficiências de valores de NDVI (para o relacionamento 1, e de teores foliares de nutrientes (para o relacionamento 2) para a obtenção dos valores de CHMR estimados respectivos aos relacionamentos:

LF: Limitante por falta ($<70\%CHMR$);

TS: Tendência a suficiente ($70\% \leq CHMR \leq 90\%$);

S: Suficiente ($90\% \leq CHMR \leq 100\%$),

A: Alto ($100\% \geq CHMR > 90\%$, à direita);

TE: Tendência a excessivo ($90\% \geq CHMR > 70\%$, à direita);

E: Excessivo ($<70\%CHMR$, à direita).

Foram também calculadas as frequências relativas (em %) de talhões em cada faixa de suficiência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

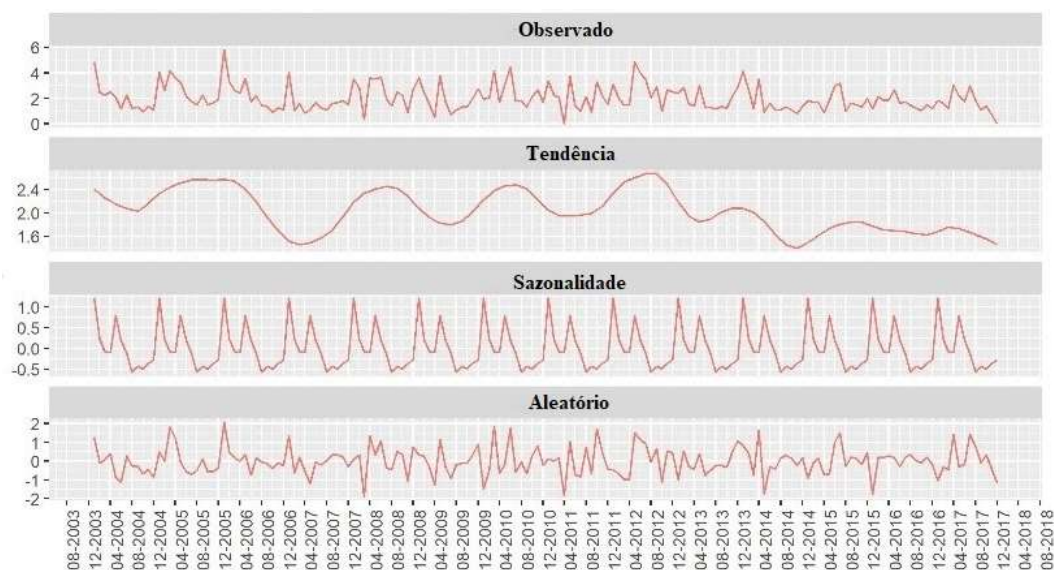
4.1 Série temporal da Sazonalidade da Produção

A sazonalidade da produção dos cachos de frutos frescos (CFF) é dependente do material genético (MGen), condições climáticas adequadas para o desenvolvimento da cultura e disponibilidade de nutrientes, que são alguns dos fatores que indicam se a tendência do valor de produção será maior ou menor que a média para cada período avaliado. No caso dos plantios de palma de óleo é importante considerar na implantação variedades que produzem em épocas diferentes para garantir a demanda da indústria ao longo do ano. O problema ocorre quando há mudanças na sazonalidade causada por outros fatores que não podem ser controlados, como, por exemplo, as condições climáticas.

A variedade Deli x Lamé é considerada como variedade padrão, pois está presente em quase todos os plantios de Palma do mundo (ALVES et al., 2011). Apresenta as seguintes características: cachos considerados pequenos, com peso menor que 18 kg e teor de óleo menor que 26%, tolerância moderada para baixa luminosidade e alta tolerância a déficit hídrico.

As variedades Deli x Avros e Deli x Ekona apresentam algumas características semelhantes, como o peso médio dos cachos de 18 a 22 kg e de 17 a 21 kg, respectivamente, além de moderada tolerância para condições de baixa luminosidade, diferindo, contudo, quanto à tolerância a seca, sendo que Deli x Avros possui baixa tolerância e Deli x Ekona se caracteriza como de tolerância moderada.

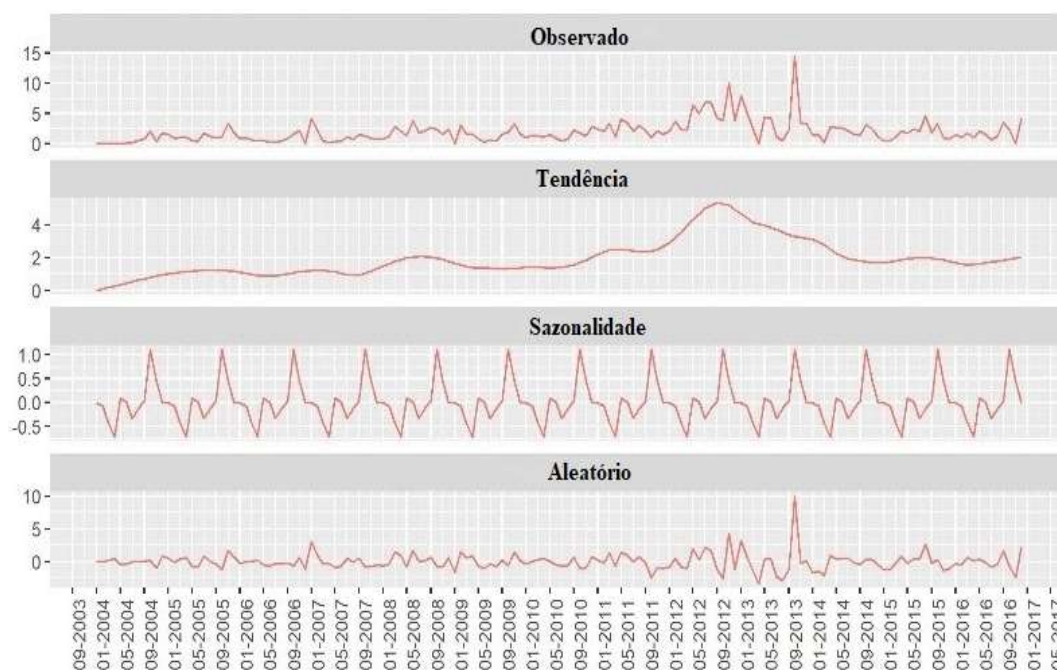
Os gráficos de sazonalidade para cada um desses MGen (Figuras 2 a 4), mostram que há uma diferença marcante entre eles. O Deli x Avros apresenta uma produção mais distribuída ao longo do ano, com dois picos de produção, o primeiro no mês de dezembro a janeiro, sendo o segundo pico, com a metade de produção do primeiro, que corresponde ao mês de abril. A recuperação da cultura ocorre de junho a novembro, que podem estar relacionados ao período de menor precipitação pluviométrica na região. Ao longo dos anos o Deli x Avros vem apresentando um mesmo padrão de produção (Figura 2).



Mês e ano de produção de CFF

Figura 2: Decomposição da série temporal do Deli x Avros ao longo dos anos.

O Deli x Ekona também apresenta períodos de produção semelhante ao Deli x Avros, sendo os meses de novembro e dezembro aqueles em que ocorre maior pico de produção. Ao longo da série temporal, no mês de junho ocorre uma segunda safra, porém inferior quando comparada à primeira.



Mês e ano de produção de CFF

Figura 3: Série temporal de sazonalidade da produção do Deli x Ekona ao longo dos anos.

O Deli x Lamé, diferentemente das outras variedades, tem período de produção muito concentrada nos meses de setembro e de outubro, e, apesar de não ter uma produção distribuída mais uniforme ao longo do ano, apresenta valores de produtividade até mesmo superior quando comparados a outros MGen.

Ocorre que essa cultura tem um grande porte de drenos em um curto período, assim, para garantir o peso médio dos cachos é fundamental que o aporte hídrico e o nutricional sejam adequados, de modo a suprir uma translocação mais uniforme de carbono e nutrientes que atenda o grande número de drenos.

A redução de CFF ou mudanças no período de safra podem ocorrer por diversos fatores, como o déficit hídrico, mudanças na insolação que podem contribuir para quedas de produção. Alguns efeitos dessas mudanças foram observados na África Ocidental e Sudeste Asiático, onde o rendimento de produção de óleo vem apresentando variações consideráveis. De acordo com a Ghana Oil Palm Development Company Limited, a região de Ghana vem atingido 14 t/ha e tem capacidade de produzir tão bem quanto as regiões da Indonésia que chegam a 28 t/ha, sendo essas diferenças explicadas por observações meteorológicas que mostram o déficit sazonal da radiação solar na região de Ghana. As imagens de satélite detectaram que os verões do sul da África Ocidental vêm recebendo um período prolongado de nuvens, sem chuvas e redução considerável da radiação solar superficial. Ao comparar essas regiões da África Ocidental foi visto que Serra Leoa, Costa do Marfim, Camarões, Benin e Nigéria receberam cerca de 55% da radiação solar que foi observada em localidades da Malásia e Indonésia. Essa diferença provocou mudanças fisiológicas determinantes no rendimento desses plantios (STENEK & CONNELL, 2011).

No final da série temporal observa-se que o período de produção está ficando mais concentrado nas áreas de Deli x Lamé e pode-se inferir que problemas relacionados com déficit hídrico, cada vez mais frequentes na região de estudo, podem estar influenciando nesses resultados. Essas questões permitem questionar sobre as possíveis alterações no período da amostragem foliar, pois se não for avaliada de forma diferente é possível que a folha coletada não reflita exatamente a dinâmica do nutriente na folha diagnóstico, haja vista que num período de safra, o solo estará exaurido com as bases retiradas, e planta com redução de nutrientes na folha diagnóstico.

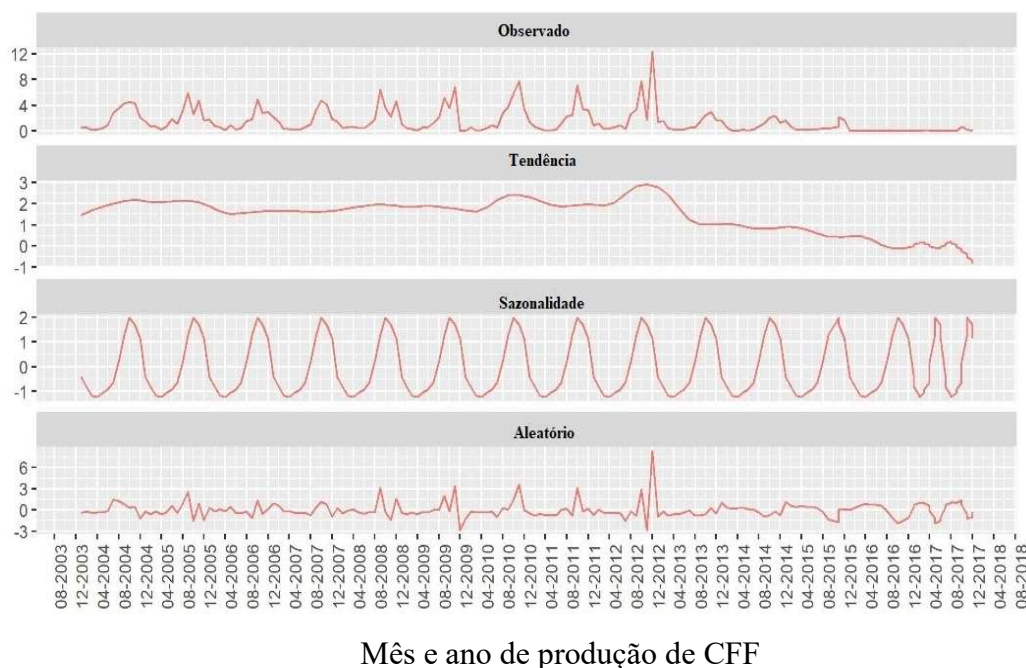


Figura 4: Série temporal de sazonalidade da produção de cachos de frutos frescos (CFF) do material genético Deli x Lamé.

4.2 Predição da Produtividade

Com base nos valores de produtividade de CFF nas idades de 7, 8 e 9 anos, foram utilizados quatro modelos para estimar a produtividade dos plantios com 10 a 25 anos, cujos erros médios e ajustes podem ser observados na Figura 5.

Os dados do erro médio absoluto (MAE), mostram que numa escala de variação de 0 a 2,0, entre os quatro modelos avaliados o Random Forest (RF) foi aquele que proporcionou o menor valor de estimativa, 1,59 CFF/t/ha a partir do valor médio de produtividade. O segundo menor valor foi do Cubist, com erro médio de 1,819 CFF/t/ha, seguido do GBM cujo erro foi de 1,821 CFF/t/ha e por último a Regressão Linear (LM) com 1,978 CFF/t/ha.

Valores de MAE informam a magnitude do erro, porém é necessário verificar os valores de R^2 para saber o nível do ajuste do modelo aos dados. A sequência decrescente dos valores de R^2 foi: RF (0,604) > GBM (0,493) > Cubist (0,488) > LM (0,411), como mostrado na Figura 6.

Os resultados do modelo RF, que se mostrou o melhor modelo, indicam que esse modelo é útil para estimar a produtividade futura de CFF a partir dos valores de produtividade de CFF nas idades de 7 a 9 anos, com grau de acerto da ordem de 60%.

Modelos de simulação de crescimento e produção tornam-se cada vez mais reconhecidos como ferramentas poderosas para monitoramento de culturas e estimativa de rendimento, além de constituírem método não destrutivo e informarem em tempo real a condição dos plantios em larga escala. Em áreas de palma de óleo a aplicação desses modelos facilita a intervenção nos plantios em períodos de pré e pós colheita, porém para que essa estimativa seja confiável é necessário identificar variáveis agronômicas chave como a maturidade das culturas, vigor e estresse fisiológico. Para a cultura da palma de óleo como ocorrem períodos diferentes de sazonalidade e a cultura é muito sensível à disponibilidade hídrica e radiação solar, o detalhamento dessas condições permite um ajuste mais adequado para a situação local ou até mesmo regional.

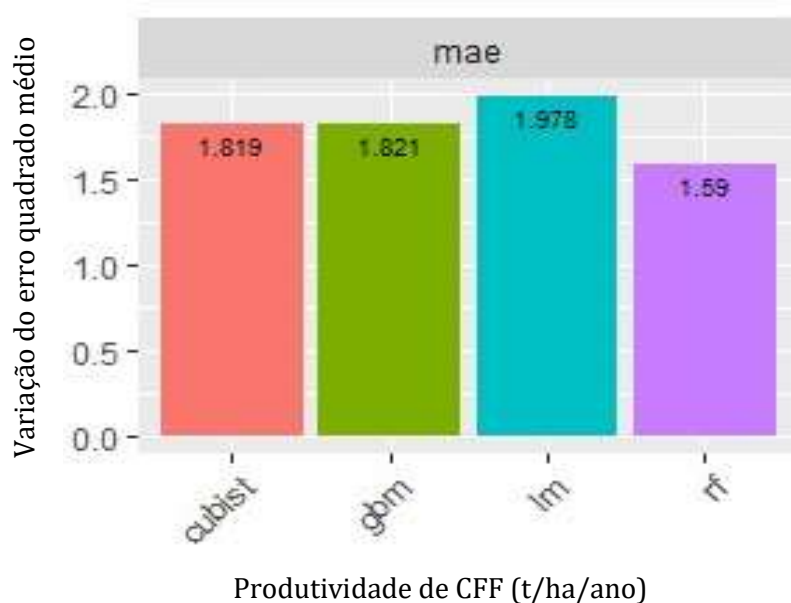


Figura 5: Erro quadrado médio (mae) dos quatro modelos utilizados na predição de produtividade futura de CFF.

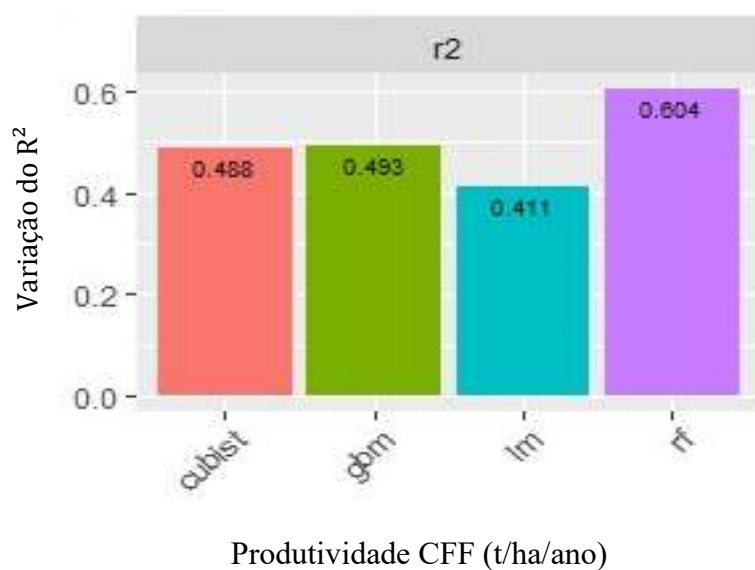


Figura 6: Valores de R^2 dos quatro modelos utilizados na predição de produtividade futura de CFF.

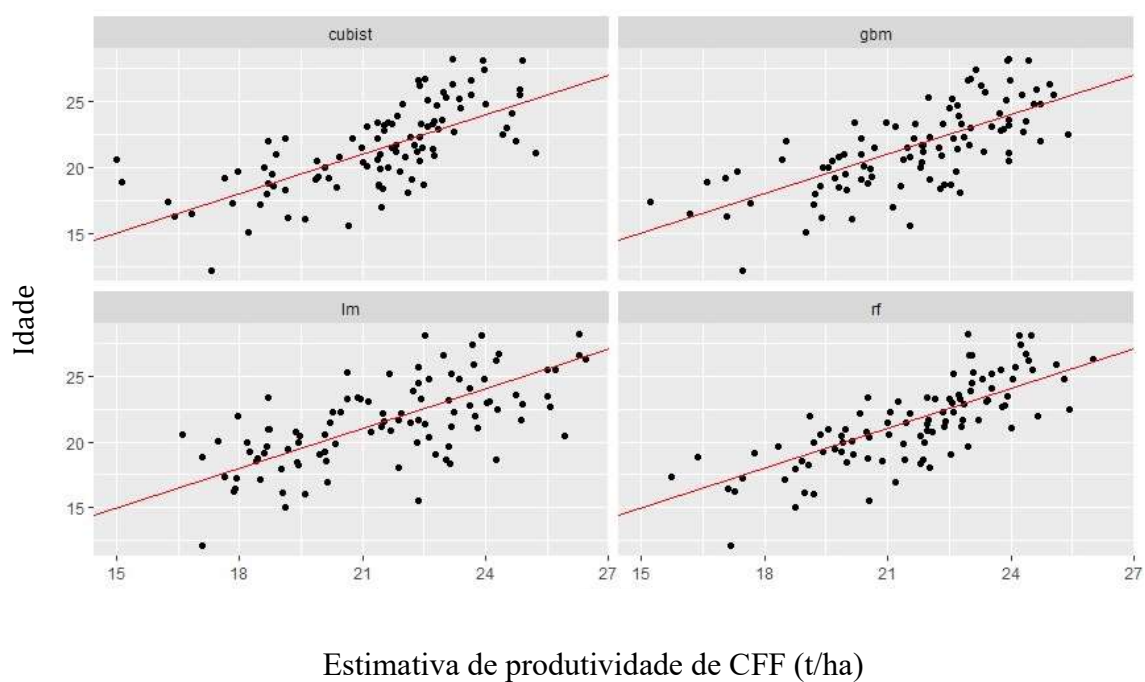


Figura 7: Estimativa de produtividade de CFF (t/ha) para as idades de 15, 20 e 25 anos, de acordo com os algoritmos de regressão: Cubist, GradientBoostingMachine (GBM), Regressão linear (Lm) e Random Forest (RF).

O desempenho dos modelos avaliados neste trabalho pode ser melhorado pela consideração de características de materiais genéticos da cultura, como sazonalidade de produção, tolerância ao déficit hídrico e sensibilidade à radiação solar, dentre outras.

A figura 7 mostra as curvas ajustadas para cada modelo. As estimativas dos valores de produtividade variaram de 15 a 27 t/ha/ano/CFF para as idades de 15, 20 e 25 anos, indicando que, dentre os quatro modelos preditivos, o RF se ajustou melhor aos dados.

4.3 Mapas de Produtividade

Os mapas de produtividades permitem ter uma visão espacial das diferenças que ocorreram em alguns departamentos nos anos de 2005, 2007, 2011, 2013 e 2016 (Figuras 8 e 9).

No ano de 2005, mais de 50% da área de cada departamento esteve presente no Q3 e Q4, ou seja, com produtividades maiores do que a média, com exceção do departamento Agropalma em que obteve aproximadamente metade da área monitorada corresponde ao Q1 e Q2. Para entender essas diferenças, buscou-se dados meteorológicos dos anos anteriores, pois esse é um fator mais determinante da produtividade da palma de óleo. Muitos trabalhos, a exemplo de BASTOS (2000) e SILVA (2006), reportam o efeito da temperatura, insolação e precipitação como determinantes da emissão foliar, diferenciação sexual das inflorescências e consequentemente na produção e peso médio dos cachos até 28 meses após. Considerando esse intervalo de tempo, 28 meses, foram avaliados os dados de precipitação dos anos de 2003 e 2004 cujos valores foram 2.339 mm e 3.137mm, respectivamente, com distribuição adequada ao longo dos anos, nos meses com menor precipitação o déficit hídrico ficou bem próximo do ideal (< 100 mm) variando de 125 mm a 61 mm. Esses valores de precipitação atendem às exigências da cultura que correspondem de 2.000 a 2.500 mm/ano (Corley & Tinker, 2003). Essa boa condição hídrica refletiu nos resultados de 2005, as áreas com baixa produção foram influenciadas por outros fatores.

No ano de 2007, em que houve mudança considerável em relação a 2005, os departamentos CPA orgânico, Amapalma e Agropar obtiveram mudanças mais severas

no sentido de reduções de produtividade. No Amapalma, praticamente 100% da área monitorada saiu do padrão de alta (em 2005) para baixa produtividade, seguido do CPA orgânico, Agropar e Agropalma que aumentou as áreas menos produtivas em relação a 2005. Em 2007, o CRAI foi o único departamento com produção mais presente no Q4. A boa distribuição de chuvas e pequenos déficit hídrico que influenciaram nas boas produtividades de 2005, não ocorreram no período de 2005 e 2006. Em 2005 a precipitação foi 2.392,1 mm e em 2006 2.642,2 mm, o grande problema foi a concentração das chuvas que provocaram déficit hídricos muito elevados, 552 mm em 2005 e em 2006, 323 mm.

Em 2011 nos departamentos Amapalma e Agropalma houve mudança considerável nos valores de produtividade, sendo este o melhor ano de produção para o departamento Agropalma. No CPA orgânico, em geral, houve baixa recuperação da produtividade, pois algumas áreas que antes ocupavam o Q1, em 2011 nem chegaram a produzir, mostrando o quanto a condição hídrica foi determinante. No CRAI, houve predomínio do Q4, mas houve declínio de produtividade em algumas poucas áreas.

No ano de 2013 no CPA orgânico houve aumento da frequência de áreas menos produtivas. Nos departamentos Amapalma e Agropalma houve quedas acentuadas de produtividade em quase todas as parcelas, diferentemente do Agropar que manteve 90% da área monitorada em Q3 e Q4. No CRAI a partir desse ano houve aumento da frequência de parcelas no Q1. Ao observar os valores de precipitação para os anos 2011 e 2012 foram 3.287,1 mm e 2.038,1 mm, com déficit hídrico de 264,8 mm e 303,1 mm, respectivamente, valores de déficit hídrico que não foram tão elevados como os verificados em 2005, já mencionados, mas podem ter sido suficientes para causar os decréscimos de produção verificados, exceto no Agropar, e mudanças nas frequências de parcelas nos quartis.

Em 2016, as quedas de produtividade foram maiores. No CRAI houve decréscimo na frequência de lavouras mais produtivas. No CPA orgânico praticamente toda a área monitorada apresentou produtividades muito baixas, bem como no Agropar. Neste departamento as parcelas que em 2013 produziam em Q3 e Q4, passaram a produzir em Q1 e Q2. Essa tendência não foi diferente para as áreas dos departamentos Amapalma e Agropalma, onde também houve aumento da frequência de parcelas no Q1, e pode ser atribuída ao fato de em 2014 a precipitação ter sido de 2.508,0 mm com déficit de 355,4 mm, e, em 2015, ter havido os menores valores de pluviosidade 1.733,6

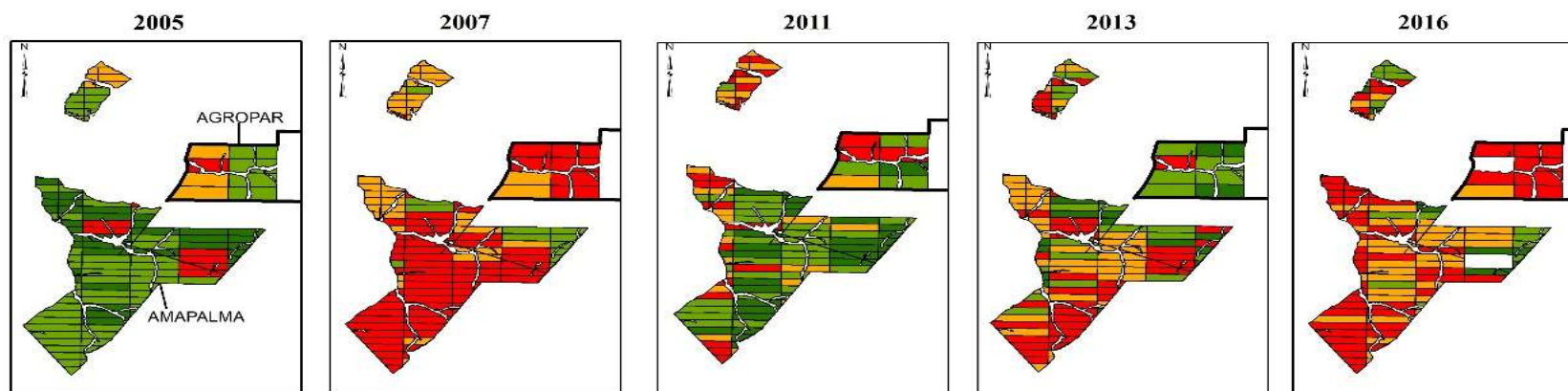
581 mm e déficit hídrico 581 mm, dos 19 anos anteriores. As chuvas foram muito concentradas no primeiro semestre de 2014 e de 2015, ocasionando períodos prolongados de seca nos seis meses subsequentes de cada um desses anos. O resultado da limitação hídrica é facilmente visualizado pela mudança de coloração nos mapas.

Em 2016, contudo, o departamento CRAI se destacou como o menos sensível a essas variações da condição climática, isso comprova que outras variáveis, além da condição climática, são também importantes e determinantes da produtividade, como o solo, o material genético e o manejo. Trata-se de uma das áreas mais antigas da empresa, podendo-se inferir que a idade mais avançada dos plantios (em fase de estabilização), e ou um material genético mais adaptado a essas condições também contribuíram para essa certa estabilidade de produção.

Em todos os outros departamentos as produtividades dos plantios foram muito sensíveis às mudanças, saindo drasticamente de uma situação com boa produtividade para valores muito baixos. No Amapalma percebe-se que são talhões altamente produtivos, sensíveis ao período de déficit, porém tem uma rápida recuperação com as condições adequadas. O mesmo não foi observado na Agropalma e CPA orgânico. A Agropalma mesmo em condições hídricas favoráveis para a cultura, apresentou rendimentos baixos em boa parte do departamento, intensificando nos períodos de maior restrição hídrica. No caso da CPA orgânica, em 2005 teve bons rendimentos, no entanto, em locais onde houve queda de produção esses talhões não conseguiram se restabelecer, o que pode estar relacionado com a pouca adaptabilidade do material genético e ou solo.

Os mapas de produtividade são úteis na identificação de áreas que vem apresentando declínio de produção ao longo dos anos e das áreas que conseguiram se restabelecer mais rapidamente. As visualizações espaciais dessas parcelas contribuem para a compreensão dos fatores que tornam alguns sítios mais produtivos em detrimento de outros e norteiam qual manejo pode ser mais indicado em novas áreas para evitar perdas significativas de produtividade.

Departamentos Amapalma e Agropar



Departamento Agropalma

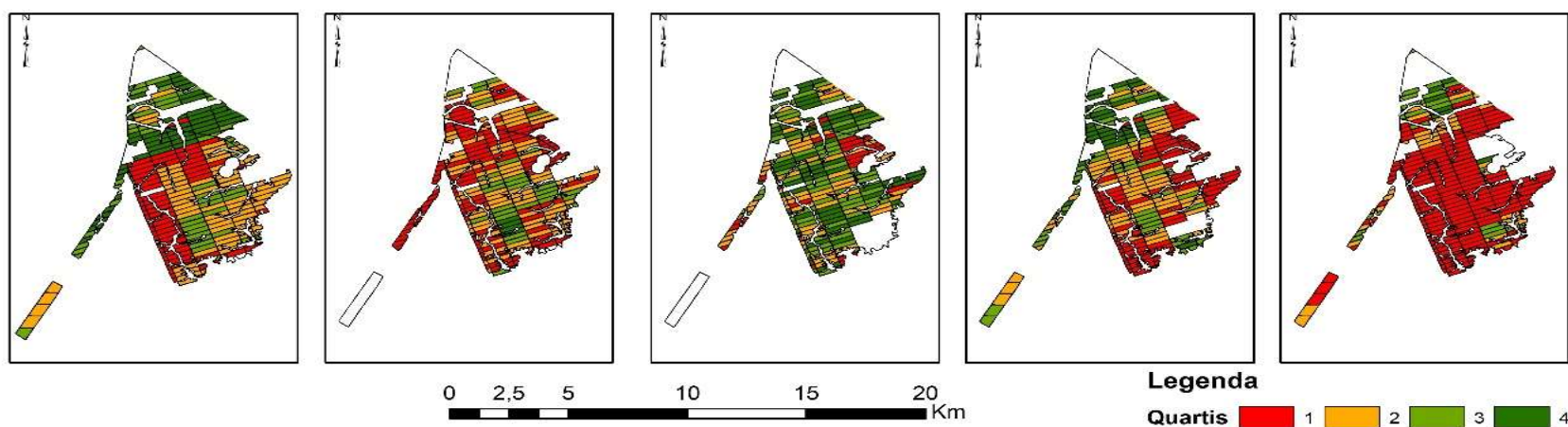
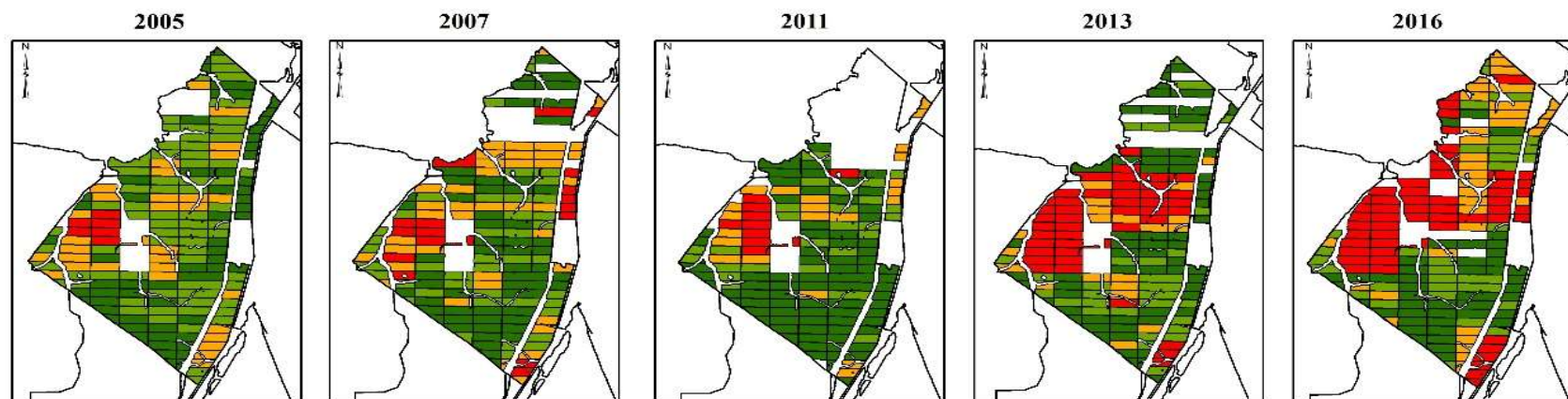
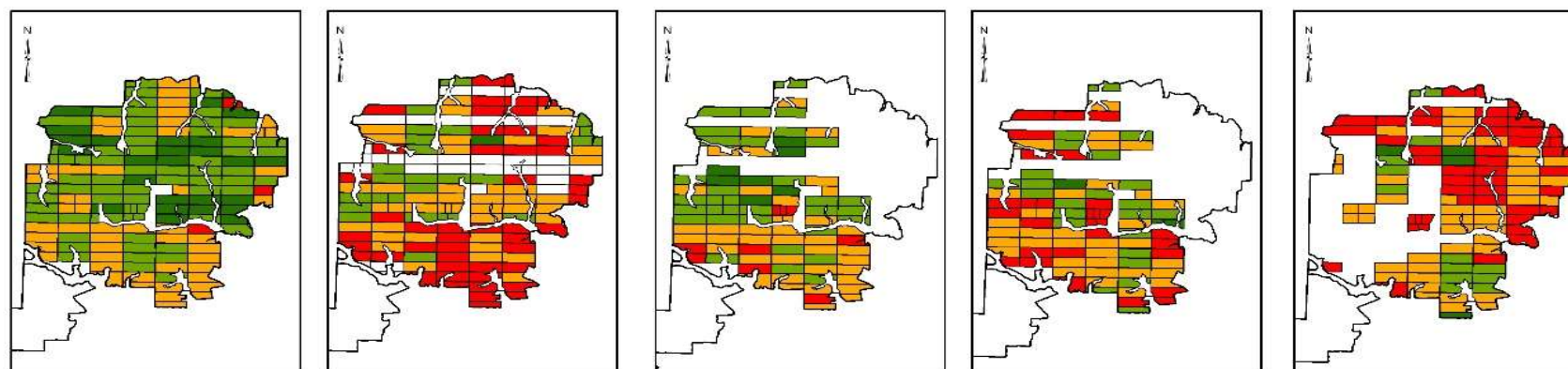


Figura 8: Mapa de Produtividade de plantios de palma de óleo da Empresa Agropalma.

Departamento CRAI



Departamento CPA Orgânico



0 2 4 8 12 16 Km

Legenda

Quartis 1 2 3 4

Figura 9: Mapa de Produtividade de plantios de palma de óleo da Empresa Agropalma.

4.4 Relacionamento da Produtividade com o NDVI

A figura 10 apresenta a relação entre chance matemática relativa da produtividade de CFF (%) e o NDVI. Observa-se assimetria nesse relacionamento, refletindo a correlação positiva e curvilínea na faixa compreendida entre 0,60 (ChMR estimado = 8,6 %) e 0,845 (ChMR estimado = 100%) e a correlação negativa e curvilínea para NDVI maiores que 0,845, por exemplo para o maior valor de NDVI verificado nos plantios estudados 0,91 a ChMR estimado corresponde a 6,81%. A faixa de valores de NDVI entre 0,832 e 0,858 corresponde a valores de ChMR estimados de no mínimo 90%. Cabe mencionar que fazendo uso da técnica de linha de fronteira (dados não mostrados), observou-se também correlação positiva e curvilínea para CFF (%) em função da variação de NDVI na faixa de 0,60 a 0,85, atingindo-se um patamar (ChMR = 100%) a partir de 0,85.

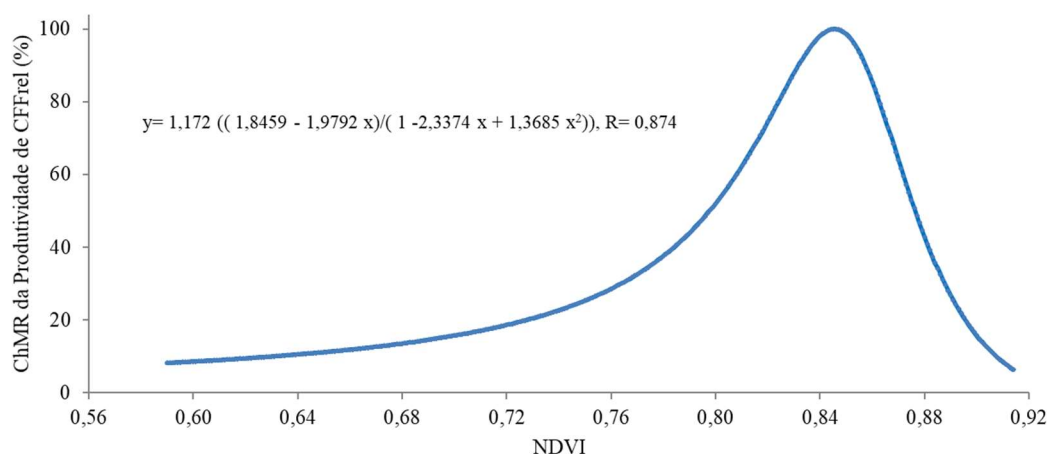


Figura 10: Chance Matemática Relativa da Produtividade de Cachos Relativa (y, %) em função do índice NDVI (x) de Plantios de Palma.

Para várias outras culturas a exemplo da cana-de-açúcar (MOLIN et al., 2010), milho (SOUZA et al., 2009) e trigo (POVH et al., 2008; GROHS et al., 2009) têm sido verificadas correlações positivas e estreitas entre produtividade e NDVI. Entretanto, para a cultura da palma de óleo não foram localizados na literatura trabalhos que apresentem um modelo para produtividade em função do NDVI.

Neste trabalho, o método da ChMR foi efetivo no sentido de relacionar CFF (%) em função do NDVI em nível de plantios comerciais da cultura.

Dessa forma, na Tabela 1 são apresentadas as faixas de suficiência do índice NDVI para os plantios estudados com idades variando de 10 a 25 anos.

Tabela 1: Faixas de suficiência do índice NDVI em plantios de palma de óleo, de 10 a 25 anos, na região de Tailândia, Pará, com base no método da Chance matemática relativa aplicado a produtividade de CFF (%) e respectivas frequências relativas (FR,%) dos plantios.

	LF	TS	S	A	TE	E
NDVI	< 0,817	0,817 -0,832	0,832 – 0,845	0,845 – 0,858	0,858 – 0,868	≥ 0,868
FR (%)	19,9	7,3	9,5	9,1	16,4	37,8

LF: Limitante por falta ($<70\%CHMR$); TS: Tendência a suficiente ($70\% \leq CHMR \leq 90\%$); S: Suficiente ($90\% \leq CHMR \leq 100\%$), A: Alto ($100\% \geq CHMR > 90\%$, à direita); TE: Tendência a excessivo ($90\% \geq CHMR > 70\%$, à direita); E: Excessivo ($<70\%CHMR$, à direita).

A análise dos valores de FR (%) constantes da tabela 1 revela que 27,2% (soma dos valores de FR para as faixas LF e TS) dos plantios com idades de 10 a 25 anos, faixa de idades em que a produtividade tende a ser mais estável, apresenta NDVI em valores que podem estar limitando a produtividade de CFF. Já o somatório das FR's para as faixas TE e E resulta em 54,2%, valor indicativo de que na maioria dos plantios dessa faixa de idade o NDVI está acima das faixas mais adequadas, quais sejam as faixas S e A. Dessa forma o somatório das FR's para essas faixas, S e A, perfaz 18,6% dos plantios estudados na faixa de idade aqui considerada.

O NDVI reflete o índice de área foliar (IAF) do plantio e a qualidade da superfície foliar. Dessa forma, o NDVI integra uma propriedade extensiva (área foliar) e uma propriedade intensiva (qualidade), sendo que ambas são importantes para o crescimento e produtividade. Em relação à qualidade da superfície foliar, há que considerar a qualidade nutricional e o conteúdo relativo de água, como mostrado na literatura para várias culturas. A propósito, e no âmbito de culturas perenes de porte arbóreo como a da palma de óleo, Lourenço (2012) verificou, para a cultura do eucalipto, que a inclusão dos teores de nutrientes e do conteúdo relativo de água na folha num modelo de regressão múltipla aumentou em 30% a capacidade preditiva do modelo quanto à produtividade de madeira, em relação a se ter apenas o IAF como variável explicativa da produtividade.

Assim, procurou-se estudar o relacionamento do NDVI em função dos teores foliares de nutrientes.

4.5 Relacionamento do NDVI com os Teores Foliares de Nutrientes

Todos os relacionamentos entre a CHMR de NDVI em função dos teores de macro e micronutrientes foram significativos (Figuras 11 e 12), o que permitiu a proposição de faixas de suficiência (Tabela 2) para os teores de cada nutriente.

A figura 11a apresenta a relação entre chance matemática relativa de NDVI em função do teor foliar de N. Observa-se correlação positiva e curvilínea na faixa compreendida entre 18,4 g/kg N (ChMRestimado = 11,3 %) e 23,8 g/kg N (ChMRestimado = 100%) e correlação negativa e curvilínea para N maior que 23,8 g/kg N, por exemplo para o maior valor de N verificado nos plantios estudados 32,24 g/kg N a ChMRestimado corresponde a 2,55%. A faixa de valores de N entre 22,5 g/kg N e 25,2 g/kg N corresponde a valores de ChMRestimados de no mínimo 90%, praticamente a mesma que a faixa Suficiente proposta por Neves (2016) 22 a 25, 2 g/kg N para a cultura da palma de óleo, para a mesma região estudada neste trabalho.

Teores inferiores a 22,5 g/kg N limitariam o NDVI por falta de N, ao passo que teores maiores que 25,2 g/kg N poderiam ser limitantes em razão de desequilíbrios de N em relação a outros nutrientes.

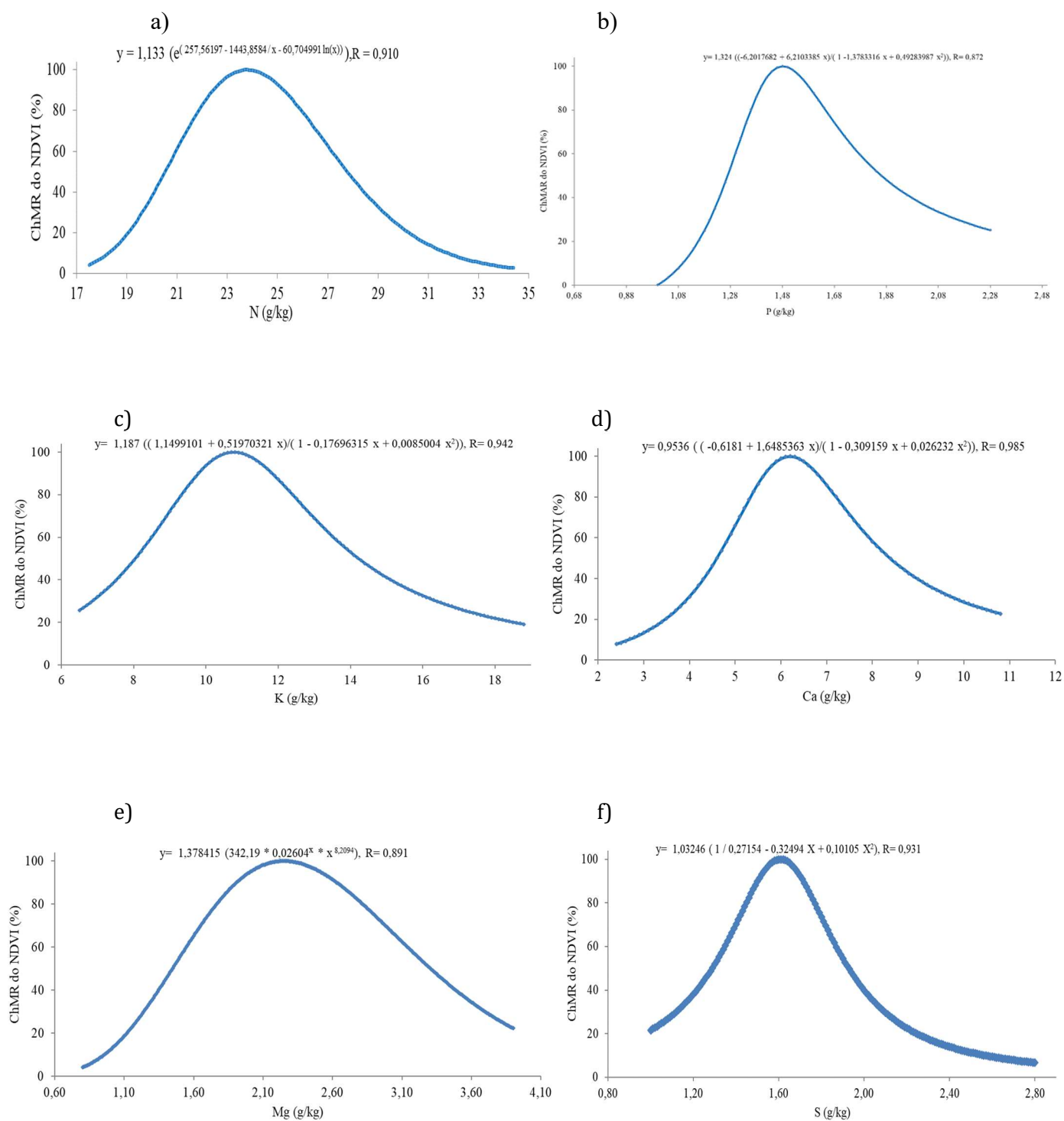


Figura 11: Gráficos da Chance Matemática Relativa (ChMR - %) do Índice NDVI dos plantios de Palma de óleo (y, %) em função dos teores foliares de macronutrientes (g/kg): N (11 a); P (11 b); K (11 c); Ca (11 d); Mg (11 e) e S(11 f).

Diversos trabalhos na literatura mostram, para outras culturas, estreita correlação entre o NDVI e teor foliar de N (MOTOMIYA; MOLIN; CHIAVEGATO, 2009), cana-de-açúcar (MOLIN et al., 2010), milho (SOUZA et al., 2009) e trigo (POVH et al., 2008; GROHS et al., 2009) e essa relação é compreensível devido as várias funções do N na planta, e como constituinte de muitos compostos orgânicos essenciais, como os aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos e algumas dessas proteínas atuam como enzimas que catalisam reações bioquímicas (MARSCHNER, 2012). Desse modo, o N desempenha papel fundamental em todos os processos fisiológicos, além de fazer parte da molécula de clorofila, responsável pela cor verde das plantas e assim com relação direta com a refletância, logo é importantíssimo para os valores de NDVI.

MARZUKHI et al. (2016) buscaram detectar a deficiência de nutrientes a partir da análise química do solo e relacionar com o NDVI obtido com imagens do satélite SPOT – 5 em plantios de dendê na Malásia. O resultado mostrou variação de 0,30 a 0,65 em áreas com 0,14% a 0,25% N total, teores no solo classificados como moderado e muito alto, respectivamente. Valores de NDVI maiores que 0,50 representaram plantas saudáveis. O R^2 do relacionamento do NDVI com o N total do solo foi de 0,86.

Carolita et al. (2015) utilizaram imagens do Landsat 5 para a obtenção de valores de NDVI em plantios jovens de dendê na Indonésia, verificando uma variação de NDVI de 0,50 a 0,55 (10 anos de idade) atingindo até 0,60 aos 12 anos, a maior idade dos plantios estudados.

Neste trabalho, o método da ChMR foi efetivo para o estudo do relacionamento do teor de N com o NDVI, cabendo notar que o menor teor de N verificado nos plantios (18,4 g/kg N) não foi causador de sintoma visual de deficiência de N.

As figuras (11 b, 11 c, 11 d, 11 e, 11 f), apresentam a relação entre chance matemática relativa de NDVI em função dos teores foliares de P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, como também feito para Cu, Fe, Zn, Mn e B nas figuras 12 (a até e, respectivamente).

Os valores de FR (%) para o P mostram que 7,9% dos plantios com idades de 10 a 25 anos, possuem teores abaixo de 1,33 g/kg, refletindo em baixos valores de NDVI. Porém, ao avaliar a FR (%) das faixas TE e E, 50% dos plantios estão concentrados nessas faixas, indicando um número considerável de plantios acima da faixa adequada. Enquanto, 42,3% estão dentro das faixas ideais de P (S e A). Teores de

P acima da faixa adequada podem comprometer o balanço nutricional, favorecendo alterações fisiológicas, além de caracterizar o consumo de luxo.

Para o K o valor da FR (%) nas faixas LF e TS revela que em 26,1% dos plantios pode estar havendo limitação nos valores de NDVI. Já o somatório da FR's que contribuem para os valores de NDVI na faixa adequada corresponde a 49,4%, valor indicativo de que aproximadamente 50% dos plantios estão dentro da faixa adequada. Contudo, 24,6% dos plantios tem os teores de K acima da faixa adequada tendo em vista o NDVI.

Para os micronutrientes Cu, Fe, Zn, Mn, B as FR(%) de plantios nas faixas LF e TS, consideradas em conjunto, foram as seguintes : 25, 1%, 16, 9%, 29, 1% 15,8% e 26,9%, respectivamente.

Nas faixas consideradas adequadas (S e A), as FR(%) de plantios foram: 35,9%, 51,9%, 38,8%, 55,3%, 35%, para Cu, Fe, Zn, Mn, B, respectivamente.

Nas faixas TE + E, as FR(%) de plantios apresentamos valores relativamente altos, 39%, 31,3% 31,3%, 28,9% e 38% para Cu, Fe, Zn, Mn e B, respectivamente, o que não é interessante do ponto de vista nutricional nem econômico

Marzukhi et al. (2016), ao relacionarem resultados de análise química de solo para P (teores desde baixos a muito altos) e K (teores adequados) com o NDVI em plantios de palma de óleo aos 15 anos, verificaram relacionamento significativo para o K, com R^2 de 0,88. Já para o P não foi obtido relacionamento significativo (R^2 de 0,38).

Neste trabalho, os resultados mostram relação significativa do K e P com NDVI, pelo método da CHMR. Assim, é importante monitorar e manter disponibilidade adequada desses nutrientes no solo e daí na planta.

A disponibilidade adequada de P é importante para a formação de maior número de inflorescências femininas e consequentemente maior probabilidade de maior produção de CFF. Já o desbalanço do K pode influenciar nas funções de outros nutrientes, tais como Mg, B, S e Ca, refletindo em menor produção de óleo, pois o Mg possui importante papel na atividade de enzimas responsáveis pela síntese de óleo, B é fundamental na polinização, fertilização e formação dos frutos, S é constituinte da enzima aciló – ACP – tioesterase que é fundamental para a formação do óleo.

A análise do relacionamento da CHMR de NDVI em função dos teores foliares de Ca mostra que as 45,1% dos plantios tem teores de Ca (TE e E) acima dos teores ideais. O excesso de Ca pode inibir a absorção de K e Mg, prejudicando a formação de

óleo (KEE et al., 2012). A FR de plantios com Ca nas faixas adequadas (S + A) é de 38,7% dos plantios, e apenas 16,3% dos plantios têm o Ca como limitante (LF + TS).

Para Mg e S, 41,9% e 50,1% dos plantios se enquadram nas faixas adequadas (S+A) para o NDVI, respectivamente. Porém, em 22,2% dos plantios para o Mg e em 20,3% para o S pode estar ocorrendo limitação ao NDVI por falta desses nutrientes (classes S +A). Já as FR de plantios com teores excessivos (classes TE+E) em Mg e em S situam-se em torno de 30%.

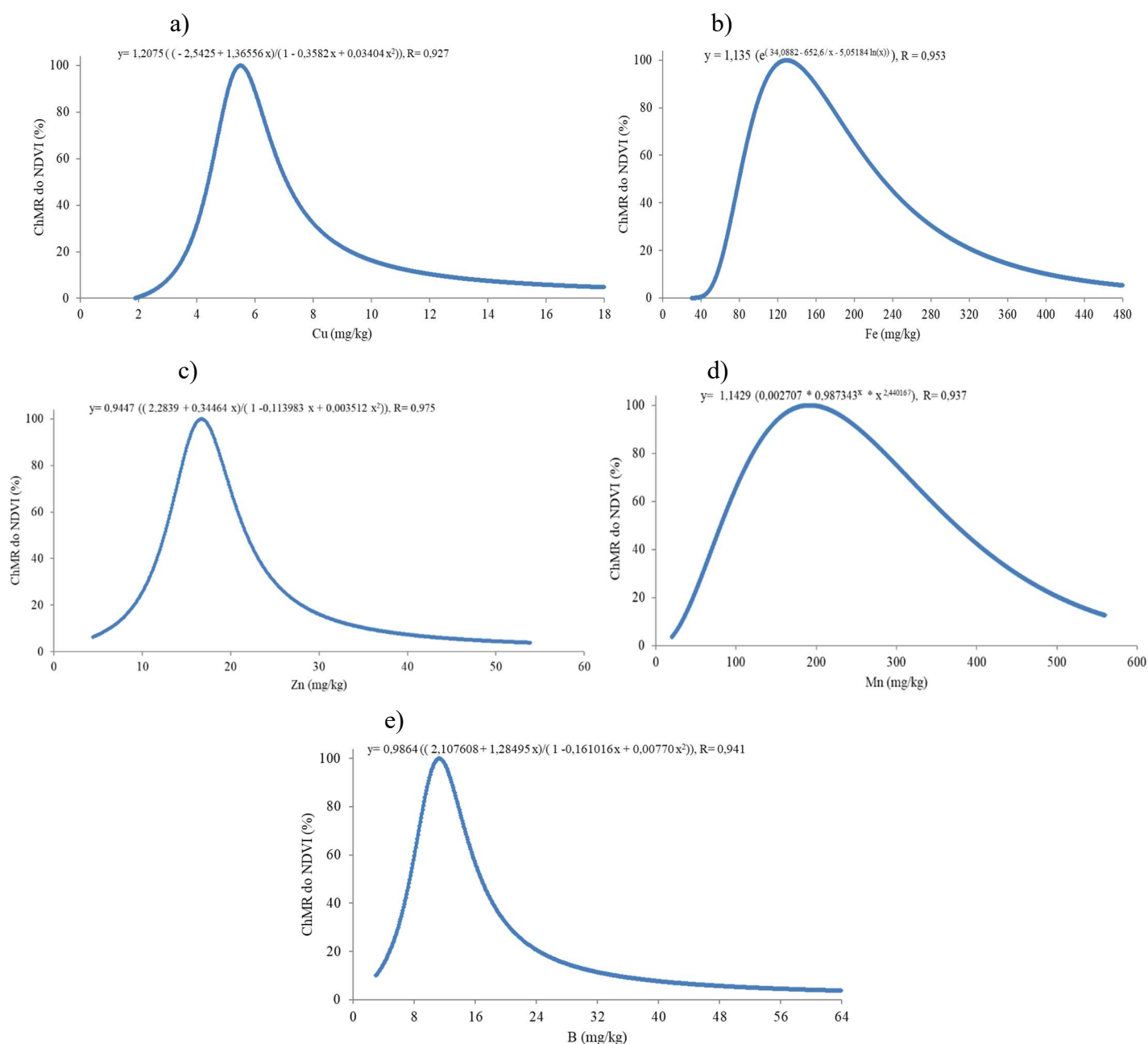


Figura 12: Gráficos da Chance Matemática Relativa (ChMR - %) do Índice NDVI dos plantios de Palma de óleo (y, %) em função dos teores foliares (mg/kg) de Cu (12 a), Fe (12 b), Zn (12 c), Mn (12 d) e B(12 e).

Tabela 2: Faixas de suficiência de teores de nutrientes em folhas de plantios de palma de óleo, de 10 a 25 anos, na região de Tailândia, Pará, com base no método da Chance Matemática Relativa aplicado ao índice NDVI e respectivas frequências relativas (FR%) dos plantios.

Nutrientes	LF< 70%	TS: 70 a 90%	S:90 a 100	A:100 a 90	TE: 90 a 70%	E: <70
N	< 21,35	21,35 - 22,45	22,45 - 23,8	23,8 - 25,25	25,25 - 26,55	≥ 26,55
FR(%)	7,40	7,90	24,30	34,70	13,90	11,80
P	< 1,33	1,33 - 1,39	1,39 - 1,48	1,48 - 1,59	1,59 - 1,71	≥ 1,71
FR(%)	7,90	0,00	15,00	27,30	26,70	23,20
K	< 8,9	8,9 - 9,8	9,8 - 10,8	10,8 - 11,9	11,9 - 12,95	≥ 12,95
FR(%)	9,50	16,60	24,60	24,80	11,00	13,60
Ca	< 5,1	5,1 - 5,6	5,6 - 6,2	6,2 - 6,85	6,85 - 7,55	≥ 7,55
FR(%)	6,80	9,50	16,90	21,80	20,00	25,10
Mg	< 1,65	1,65- 1,91	1,91 - 2,25	2,25 - 2,63	2,63 - 2,98	≥ 2,98
FR(%)	11,20	11,04	21,77	27,29	14,67	14,04
S	< 1,4	1,4 - 1,5	1,5 - 1,61	1,61 - 1,715	1,715 - 1,82	≥ 1,82
FR(%)	13,70	6,60	29,70	20,50	12,50	17,00
Cu	< 4,73	4,73 - 5,09	5,09 - 5,5	5,5 - 5,97	5,97 - 6,49	≥ 6,49
FR(%)	15,80	9,30	15,60	20,30	12,50	26,50
Fe	< 90,8	90,8 – 106	106 - 129	129 - 159,6	159,6- 192,9	≥ 192
FR(%)	8,70	8,20	22,20	29,70	17,40	13,90
Zn	< 13,9	13,9 - 15,2	15,2 - 16,7	16,7 - 18,3	18,3 - 20	≥ 20
FR(%)	15,10	14,00	17,50	21,30	14,20	17,10
Mn	< 105,8	105,8 - 140,7	140,7 - 191,4	191,4 - 253,6	253,6 - 314,7	≥ 314,7
FR(%)	5,40	14,40	29,00	26,30	17,40	11,50
B	< 8,6	8,6 - 9,9	9,9 - 11,3	11,3 - 13	13 - 14,7	≥ 14,7
FR(%)	12,90	14,00	17,50	17,50	11,70	26,30

LF: Limitante por falta (<70%CHMR); TS: Tendência a suficiente (70%≤CHMR≤90%); S: Suficiente (90%≤CHMR≤100%), A: Alto (100%≥CHMR >90%, à direita); TE: Tendência a excessivo (90%≥CHMR >70%, à direita); E: Excessivo (<70%CHMR, à direita).

Também utilizou-se o método da ChM para identificar qual o valor ou faixa de valores de NDVI que correspondem ao teor foliar adequado de nutrientes, como mostrado para N, cuja faixa suficiente varia de 22 a 25,2 g/kg (Neves, 2016) para os plantios de palma de óleo na área de estudo, na figura 13

A figura 13 mostra que para valores de NDVI na faixa de 0,58 (o menor valor observado neste trabalho) a 0,79 a CHMR de ter o N na faixa de teores adequados é muito baixa. A partir de NDVI 0,79 há aumento expressivo dessa CHMR até o NDVI 0,88 com queda acentuada após atingir esse ponto. Nesse intervalo encontra-se a média

de NDVI dos plantios na área estudada, cujo valor é 0,846, valor este bem próximo do ponto máximo da curva, ou seja, a FR de plantios com N adequado (S+A) supera 50% se o NDVI estiver na faixa de 0,79 a 0,88.

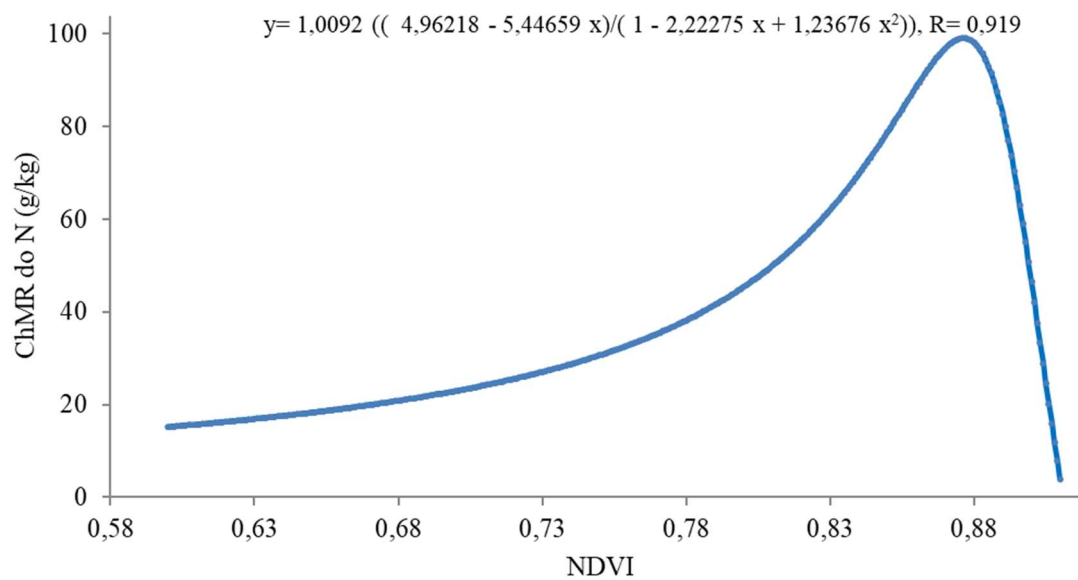


Figura 13: Chance Matemática Relativa do teor de N estar em faixa adequada em função dos valores de NDVI.

5 CONCLUSÕES

A técnica de Séries Temporais foi eficiente no estudo da sazonalidade de produção de palma de óleo;

A sazonalidade de produção intraanual é distinta conforme o material genético de palma de óleo, e, para o Deli x Lamé se acentua com o aumento do período de déficit hídrico;

A predição de produtividade em idades mais avançadas pode ser feita com base na produtividade de plantios jovens da cultura de palma de óleo, mediante redes neurais artificiais, a exemplo do modelo Random Forest;

A utilização do NDVI e do método da Chance Matemática Relativa (ChMR) possibilitam a obtenção de faixas de suficiência de teores foliares de nutrientes, concordantes com as obtidas por métodos tradicionais de diagnose, de modo a assistir o monitoramento do estado nutricional da cultura de palma de óleo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGROPALMA. 2015. Relatório de Sustentabilidade. 71 p.
- Alves, S. A. O.; Amaral, W. A. N.; Horbach, M. A.; Antiqueira, L. M. O. R.; Braga, L. P. P.; Dias, I. F. S. 2013. A dendeicultura no Estado do Pará: cenário atual, entraves e perspectivas. *Bioenergia em Revista: Diálogos* 3:18-28.
- Alves, S. A. O.; Lemos, O. F.; Filho, B. G. dos S.; Silva, A. L. L. 2011. In vitro embryo rescue of interspecific hybrids of oil palm (*Elaeisoleifera* x *Elaeisguineensis*). *Journal of Biotechnology and Biodiversity* 2 (2): 1-6.
- Associação Brasileira de Produtores de Palma de Óleo. 2016. Déficit hídrico e impacto na produção de óleo de palma. Belém: ABRAPALMA. 13 p. (Nota técnica nº 001).
- Bastos, T. X. 2000. Aspectos agroclimáticos do dedeizeiro na Amazônia Oriental. In: Viégas, I. de J. M.; Muller, A. A. (Ed). A cultura do dedeizeiro na Amazônia Brasileira. Belém: Embrapa Amazônia Oriental/Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. 47-59p.
- Carolita, I.; Sitorus, L.; Manalu, J.; Wiratmoko, D. 2015. Growth profile analysis of oil palm by using spot 6 the case of North Sumatra. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences* 12 (1): 21-26.
- Comte, I.; Colin, F.; Whalen, J. K.; Grünberger, O.; Caliman, J. P. 2012. Agricultural Practices in Oil Palm Plantations and Their Impact on Hydrological Changes, Nutrient Fluxes and Water Quality in Indonesia: A Review. In Sparks, D. (Eds). *Advances in Agronomy*. Burlington 71-124pp. ^[1]_[SEP]
- Corley, R. H. V.; Tinker, P. B. O óleo de palma. Malden: Wiley Blackwell. 5a ed., 2015.
- Corley, R. H. V.; Tinker, P. B. The Oil Palm. Oxford: Blackwell Science. 4a ed., 2003, 562 p.
- Ditschar, B.; Jaramillo, R.; Thomas, F. 2003. La Palma de Aceite em América Central y América del Sul. In: Fairhurst, T. H.; Hardter, R. (Eds.). *Palma de Aceite: Manejo para Rendimientos Altos y Sostenibles*. Singapore: IPNI: IPI, 412 p.
- Fernandes, L. V. Normas e determinação de faixas de suficiência para diagnose foliar com base no crescimento relativo de eucalipto. Tese de Doutorado, Viçosa. Universidade Federal de Viçosa. 85 p.
- Gomes Júnior, R. A.; Barra, V.R. 2010. Seleção de áreas aptas para o cultivo sustentável da palma de óleo. In: Gomes Júnior, R. A. (Ed). *Bases técnicas para a cultura da palma de óleo integrado na unidade produtiva da agricultura familiar*. Belém/Pa: Embrapa Amazônia Oriental. 190 p.

Grohs, D. S.; Bredemeier, C.; Mundstock, C. M.; Poletto, N. 2009. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. *Engenharia Agrícola* 29 (1): 101-112.

Guzmán, C. P. H. 2014. Teores referências de nutrientes em folhas de dendê (*Elaeis guineenses*. Jacq) para as condições da Amazônia. Dissertação de mestrado, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 74 p.

Jensen, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. São José dos Campos. Parêntese Editora. 2a ed., 2009, 598 p.

Kee, N. S.; Uexkull, H. V.; Hardter, R. 2012. Aspectos Botânicos de la Palma de Aceite Pertinentes al Manejo del Cultivo. In Fairthurst, T.; Hardter, R. (Eds). Palma de Aceite: Manejo para Rendimientos Altos y Sostenibles. InternationalPlantNutritionInstitute. 129p.

Ker, J. C.; Neves, J. C. L. Relatório Técnico Agropalma. (Consultoria técnica) Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2010. 21 p.

Lourenço, H. M. 2012. Diagnose nutricional de Eucalipto e impacto da disponibilidade de água e nutrientes nos estoques de carbono do povoamento. Dissertação de mestrado, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 113p.

Marschner, P. 2012. Introduction, Definition and Classification of Nutrients. In Ernest Kirkby, E. (Eds). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. University of Leeds, UK 3- 56pp.

Marzukhi, F.; Elahami, A. L.; Bohari, S. N. 2016. Detecting nutrients deficiencies of oil palm trees using remotely sensed data. *Earth and Environmental Science* 37: 1-11.

Matos, G. S. B.; Fernandes, A. R.; Wadt, P. G. S. 2016. Níveis críticos e faixas de suficiência de nutrientes derivados de métodos de avaliação do estado nutricional da palma-de-óleo. *Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51 (9): 1557-1567.

Molin, J. P.; Frasson, F. R.; Amaral, L. R.; Povh, F. P.; Salvi, J. V. 2010. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14: (12) 1345-1349.

Moraes, V. H. F.; Bastos, T. X. 1972. Viabilidade e limitações climáticas para as culturas permanentes e anuais com possibilidade de expansão na Amazônia brasileira. *Boletim técnico do Instituto de Pesquisa Agropecuário do Norte, Belém: IPEAN* 54: 68-122.

Motomiya, A. V. A.; Molin, J. P.; Chiavegato, E. D. 2009. Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13 (2):137-145.

Murphy, D. Y. 2003. Working to improve the oil palm crop. *Inform* 14 (11): 670-671.

Neves, J. C. L. Relatório técnico Agropalma (Consultoria Técnica), Universidade Federal de Viçosa, MG. 2016.

Parente, V. M. 2003. Potencialidades regionais - Estudo de viabilidade econômica: Dendê. Manaus: Suframa.

Ponzoni, F. J.; Shimaukuro, Y. E. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. São José dos Campos. A.1a ed., 2007, 127 p.

Potter, L. 2015. Managing oil palm landscapes: A seven-country survey of the modern palm oil industry in Southeast Asia, Latin America and West Africa. Occasional Paper 122. Bogor, Indonésia: CIFOR. 154 p.

Povh, F. P.; Molin, J. P.; Gimenez, L. M.; Pauletti, V.; Molin, R.; Salvi, J. V. 2008. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. Pesquisa Agropecuária Brasileira 43 (8): 1075-1083.

Reznick, J. P. K. 2017. Produtividade, qualidade industrial e nutricional na cultura do trigo. Dissertação de mestrado, Curitiba, Universidade Federal do Paraná. 64p.

Rocha, M. G.; Castro, A. M. G. 2012. Fatores limitantes à expansão dos sistemas produtivos de palma na Amazônia. Brasília, DF: Embrapa. Departamento Transferência de Tecnologia. 43 p.

Rodrigues, M. R. L.; Amblard P.; Barcelos, E.; Macedo, J. L. V.; Cunha, R. N. V.; Tavares, A. M. 2006. Avaliação do estado nutricional do dendezeiro: análise foliar (Reformulada). Manaus: Embrapa Amazônia Oriental. Circular técnica, 26.

Silva, J. S. 2006. Produtividade de óleo de palma na cultura do dendê na Amazônia Oriental: Influência do clima e do material genético. Dissertação de mestrado, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 95p.

Souza, E. G.; Rocha, T.; Uribe-Opazo, M. A.; Nóbrega, L. H. P. 2009. Índices de vegetação no milho em função da hora do dia e da taxa de nitrogênio aplicada. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 13: 865-872.

Stenek, V.; Connell, R. 2011. Climate risk and business: Agribusiness. Ghana Oil Palm Development Company full report. Disponível em International Finance Corporation website: <<http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/f4d776804a5202b58bbb9faa52ef3b86/IFC+Climate+Risk-GOPDC+full+report.pdf?MOD=AJPERES>>

Thoumi, G. 2018. Palm Oil: Mitigating Material Financial Risks via Sustainability. In: Walker, T. et al. (Eds). Designing a Sustainable Financial System. Washington, USA, 289p.

Wadt, P. G. S.; Novais, R. F.; Alvarez, V. H.; Fonseca, S.; Barros, N. F. 1998. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos dris e chance matemática. Revista Brasileira de Ciência de Solos 22: 685-692.