**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de
São Paulo, com base em critérios agrometeorológicos**

Luciano Henrique de Souza Vieira

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2017**

Luciano Henrique de Souza Vieira
Engenheiro Agrícola

**Dias trabalháveis para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado
de São Paulo, com base em critérios agrometeorológicos**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR SENTELHAS**

Co-orientador:
Prof. Dr. **MARCOS MILAN**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Vieira, Luciano Henrique de Souza

Dias trabalháveis para colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo com base em critérios agrometeorológicos / Luciano Henrique de Souza Vieira. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

142 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Modelo agrometeorológico 2. Regressão linear múltipla 3. Cadeia de Markov 4. Sequência de dias trabalháveis I. Título

DEDICATÓRIA

Ao meu avô, por ser minha eterna fonte de inspiração.

À minha avó, sempre me motivando.

À minha madrinha, minha primeira grande professora e orientadora.

À minha esposa, minha companheira para todos os momentos.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

À minha família que sempre me apoiou e motivou para que eu conquistasse meus objetivos, em especial à minha esposa Francianne S. G. de Carvalho Vieira (Fran), a qual não tenho palavras para agradecer por absolutamente tudo que ela representa na minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Paulo Cesar Sentelhas, pelos ensinamentos, puxões de orelha, incentivos e toda a dedicação excepcional que teve à este trabalho.

Ao meu co-orientador, Prof. Marcos Milan, que me fez ver a gestão de sistemas mecanizados de outra forma e que sempre mostrou a importância deste trabalho.

Ao meu gerente, Fernando Aparecido Benvenuti, que sempre me apoiou, incentivou e acreditou na importância da pós-graduação para nosso desenvolvimento. Tenho certeza que ele sabe que esta conquista também é dele.

À Raízen Energia S.A. pela oportunidade de realização deste trabalho, em especial aos meus colegas do departamento de Engenharia Agrícola e Geotecnologias, pessoas excepcionais que tornam o trabalho muito mais agradável. Não poderia deixar um agradecimento especial aos meus colegas de departamento, Jean Carlos Quaresma Mariano, pelas importantes contribuições neste trabalho, ao Daniel Carmignani Grisotto pelas contribuições e ensinamentos em QGIS e ao Ralph Guenther Hammer pelo incentivo sempre constante não me deixando desistir.

Às empresas que forneceram dados para que este trabalho pudesse ser realizado, espero que este possa contribuir para o desenvolvimento do setor sucroenergético.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela oportunidade de realização do doutorado. Agradeço também aos professores do programa de Pós-Graduação da Esalq/USP os quais contribuíram para o meu aprimoramento, além dos funcionários administrativos, em especial à Davilmar A. Colevatti por toda a ajuda.

Ao Vinicius Perin (Vini) pelo companherismo, ajuda e incentivo na confecção dos mapas de regressão.

Aos colegas de Esalq, em especial ao Henrique Boriolo Dias, pelo apoio.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho e conclusão de mais esta etapa em minha vida.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO GERAL	11
REFERÊNCIAS	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. O SETOR SUCROENERGÉTICO NO BRASIL.....	15
2.2. CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	16
2.3. MECANIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DO SOLO	17
2.4. BALANÇO HÍDRICO E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	18
2.5. DETERMINAÇÃO DOS DIAS TRABALHÁVEIS	21
REFERÊNCIAS	27
3. CARACTERIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DE DIAS TRABALHÁVEIS PARA COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO.....	33
RESUMO.....	33
ABSTRACT	34
3.1. INTRODUÇÃO.....	35
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	40
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
3.4. CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS	59
4. NÚMERO DE DIAS TRABALHÁVEIS PARA A COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO.....	63
RESUMO.....	63
ABSTRACT	64
4.1. INTRODUÇÃO.....	65
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	67
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.4. CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIAS	83

5. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE SEQUÊNCIA DE DIAS TRABALHÁVEIS PARA COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO, POR MEIO DA CADEIA DE MARKOV	87
RESUMO	87
ABSTRACT.....	88
5.1. INTRODUÇÃO	88
5.2. MATERIAL E MÉTODOS	90
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.4. CONCLUSÃO	107
REFERÊNCIAS	108
6. DIMENSIONAMENTO DE FROTA PARA COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR COM BASE EM DIAS TRABALHÁVEIS – ESTUDO DE CASO PARA AS REGIÕES DE ARAÇATUBA E PIRACICABA, SP	111
RESUMO	111
ABSTRACT.....	112
6.1. INTRODUÇÃO	112
6.2. MATERIAL E MÉTODOS	115
6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	122
6.4. CONCLUSÃO	129
REFERÊNCIAS	130
ANEXOS.....	133

RESUMO

Dias trabalháveis para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, com base em critérios agrometeorológicos

A determinação de dias trabalháveis para operações agrícolas de campo é de extrema importância para o dimensionamento de frotas de máquinas agrícolas. Isso é especialmente importante para a cultura da cana-de-açúcar, na qual as operações de campo se estendem por todo o ano, sendo a colheita a operação que mais danos pode trazer aos solos, quando executada sob condições inadequadas, já que essa ocorre por cerca de 8 a 10 meses. Com base nisso, o presente estudo teve como objetivos: definir os critérios para a determinação do número de dias trabalháveis (NDT) para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo; determinar o NDT de diferentes regiões do estado de São Paulo com base em um critério geral e em critérios específicos para cada região; determinar a probabilidade de ocorrência de sequência do NDT por meio da cadeia de Markov; e elaborar uma planilha modelo para dimensionamento de frota para colheita mecanizada da cana-de-açúcar com base no NDT gerado pelo critério individual e geral. Para a definição dos critérios do NDT foram empregados dados de interrupção da moagem de 30 usinas no estado de São Paulo, para períodos variando de duas a cinco safras. Foram testados critérios de precipitação mínima (PREC), capacidade de água disponível (CAD) e limite da relação entre o armazenamento de água no solo e CAD (ARM/CAD) para se interromper a operação de colheita. De posse dos critérios de PREC, CAD e ARM/CAD para cada região e um critério geral, foram elaborados mapas do NDT para o estado de São Paulo. Posteriormente, definiu-se com base na cadeia de Markov, as probabilidades condicionais e, por meio dessas, as probabilidades de sequência de dias trabalháveis para cada decêndio do ano. Finalmente, foi elaborada uma planilha Excel® para o dimensionamento de frota de colhedoras de cana, com base no NDT. Os resultados mostraram que houve variação no critério para definição do NDT nas diferentes regiões do estado. No entanto, o uso de um critério geral para todo o estado, considerando-se a PREC de 3 mm, CAD de 40 mm e ARM/CAD de 90%, proporcionou resultados muito similares. O mapa de NDT gerado a partir do critério individual para cada região resultou em um erro médio de 24,9 dias por ano, ao passo que o mapa gerado a partir do critério geral resultou em um erro médio de 4,4 dias por ano, sendo este último mais adequado para a determinação do NDT médio para a colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Com relação à probabilidade de sequência de dias trabalháveis, observou-se que nas regiões a oeste, noroeste e norte do estado há, em média, maiores probabilidades de ocorrência de dias trabalháveis, sendo que as maiores probabilidades ocorreram entre abril e setembro, com o primeiro decêndio de julho sendo o que tem os maiores valores. A probabilidade de o dia ser trabalhável dado que o anterior foi trabalhável manteve-se sempre com o mínimo em torno de 50% de probabilidade e com o máximo próximo de 90% em todas as regiões avaliadas. Finalmente, observou-se que a variação do NDT em função do critério usado (individual ou geral) não

teve impacto expressivo nos custos de produção e totais. Com base nos resultados apresentados, conclui-se que a determinação correta do NDT é fundamental para o dimensionamento de sistemas de colheita da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Modelo agrometeorológico; Regressão linear múltipla; Cadeia de Markov; Sequência de dias trabalháveis

ABSTRACT

Workable days for sugarcane harvesting in the State of São Paulo, Brazil, based on agrometeorological criteria

The determination of workable days for agricultural field operations is of extreme importance for dimensioning agricultural machinery fleets. This is especially important for sugarcane cultivation, in which field operations extend throughout the year, from 8 to 10 months per year. Based on this, the present study had as objectives: to define the criteria for determining the number of workable days (NWD) for sugarcane harvest in the state of São Paulo; to determine the NWD of different regions of the state of São Paulo based on general criteria and on specific criteria to each region; to determine the probability of a given NWD sequence by means of the Markov chain; and to elaborate a spreadsheet model for sizing the fleet to harvest sugarcane based on the NWD generated by the individual and general criteria. For the definition of NWD criteria, the data from harvest interruption of 30 mills in the state of São Paulo, for periods ranging from two to five harvests, were used. The following criteria were tested: minimum precipitation (PREC); soil water holding capacity (SWHC) and the limit of the relationship between soil moisture storage and SWHC (ARM/SWHC), to define the harvest interruption. Based on these criteria for each region and also a general criteria, NWD maps were prepared for the state of São Paulo. Afterwards, the conditional probabilities were defined on the basis of the Markov chain, and based on them the probabilities of sequences of working days were defined for all year long for each 10-day periods. Finally, an Excel® spreadsheet was programmed for dimensioning sugarcane harvest machines, based on the NWD. The results showed that there was variation in the criteria for the definition of NWD in the different regions of the state. However, the use of a general criteria for the whole state, considering PREC of 3 mm, SWHC of 40 mm and ARM/SWHC of 90% provided very similar results. The NWD maps generated from the individual criteria for each region generated an average error of 24.9 days per year whereas the map generated from the general criteria resulted in an average error of 4.4 days per year, being the last map the most suitable for determining the average NWD. Regarding the probability of sequences of workable days, it was observed that in the western, northwestern and northern regions of the state there is, on average, a greater probability of workable days, with the periods of greatest probability of workable days being between April and September. The probability of the a day be workable considering that the previous one was workable, always remained between 50% and 90% probability in all regions. Finally, for dimensioning harvest machines, it was observed that the variation of NWD as a function of the criteria used (individual or general) had no significant impact on production and total costs, but affected the total investment. It was concluded that the correct determination of NWD is fundamental for the design of sugarcane harvesting systems.

Keywords: Agrometeorological model; Multiple linear regression; Markov chain; Sequence of working days

1. INTRODUÇÃO GERAL

Recentemente, com a expansão do setor sucroenergético, tanto os solos com poucas limitações como aqueles que apresentam riscos permanentes ao cultivo intensivo tiveram sua vegetação nativa removida e foram incorporados ao processo produtivo (SEVERIANO et al., 2009). Para que os riscos de degradação do ambiente de produção da cana-de-açúcar sejam minimizados, a adoção de sistemas de manejo que visem manter a estrutura do solo é o ponto chave para a manutenção da sustentabilidade dos agrossistemas canavieiros.

O processo atual de produção de cana-de-açúcar está baseado em unidades onde se realizam o plantio e o cultivo em uma ou duas linhas, com tratores que têm no máximo 2,0 m de bitola. No entanto, a colheita é feita em linhas simples, acompanhada do veículo de transbordo na linha adjacente. Como consequência disso, verifica-se um tráfego intenso na área, com baixo rendimento operacional, alto custo e elevada compactação dos solos (ROQUE et al., 2010). Esses são os principais fatores que obrigam a replantação do canavial a cada cinco anos, já que ao final desse período o solo se encontra com alta limitação para o desenvolvimento radicular das soqueiras. Atualmente, com a intensificação da produção da cana-de-açúcar, com as colheitas se estendendo de março a dezembro, tem havido uma maior preocupação com os problemas relacionados à compactação do solo resultante das operações mecanizadas, especialmente quando realizadas em condições de umidade elevada (Silva e Cabeda, 2006).

Além dos aspectos mencionados, acrescenta-se a necessidade de maiores conhecimentos das implicações do intenso tráfego de máquinas nos canaviais já que mesmo no período de “entre safra”, no qual não há colheita intensiva, as operações de plantio/renovação do canavial e de tratos culturais ocorrem, ocasionando tráfego de máquinas nos períodos de elevada umidade no solo.

Portanto, o estudo do número de dias trabalháveis para a realização de operações de campo com máquinas agrícolas se configura como de extrema importância para se minimizar os possíveis impactos do tráfego de máquinas nos solos quando estes se encontrarem com elevada umidade, prevenindo, assim, a compactação dos mesmos.

Segundo Mialhe (1974), para mecanização agrícola um dia úmido ou desfavorável é caracterizado como aquele em que o teor de água no solo impede ou

dificulta o tráfego de tratores e a eficiência do uso de implementos. De acordo com este autor, diversas pesquisas no mundo têm apontado para a utilização do balanço hídrico do solo para avaliar o estado dinâmico de sua umidade e suas condições de manejo. Tais modelos empregam diferentes dados e suposições, gerando grandes variações dos resultados.

Castro Neto (2001) enfatiza que o estudo climático da frequência de dias aptos aos diversos trabalhos com máquinas agrícolas tem sido feito com base em dados meteorológicos históricos e apresenta grande importância para planejamento, seleção e racionalização da mecanização de atividades agrícolas, embora nem sempre sejam levados em conta nos dimensionamentos de frotas.

No setor sucroenergético, observa-se que o dimensionamento das frotas vem sendo feito com base em critérios econômicos e logísticos, sem contudo, levar em consideração quantos dias efetivos existem para as atividades de campo. Assim, para se dimensionar o número de frotas agrícolas necessárias à determinada atividade ou o tempo efetivo disponível para que esta mesma máquina execute determinada operação, é de fundamental importância se conhecer o conteúdo de água no solo e a influência que este tem sobre uma dada operação de campo, definindo assim a real magnitude de quantos dias efetivamente trabalháveis existem no ano safra para tal operação.

Com base no exposto acima, este estudo tem como principal hipótese que o conhecimento das condições ideais de umidade do solo para uma dada operação agrícola de campo possibilita a definição dos dias trabalháveis e, portanto, para o dimensionamento de frotas, o qual pode ser determinado com base em critérios agrometeorológicos relacionados à precipitação (PREC), ao tipo de solo e sua capacidade de água disponível (CAD) e ao limite de umidade do solo, representado pela relação entre o armazenamento de água no solo e a CAD (ARM/CAD). Sendo assim, os objetivos gerais deste estudo foram:

- 1) Caracterizar os critérios para determinação de dias trabalháveis para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo;
- 2) Determinar os dias trabalháveis para colheita mecanizada da cana-de-açúcar para diferentes regiões do estado de São Paulo;
- 3) Definir a probabilidade de ocorrência de sequência de dias trabalháveis para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo por meio da cadeia de Markov;

- 4) Dimensionar a frota para colheita mecanizada da cana-de-açúcar com base no número de dias trabalháveis para duas regiões com climas contrastantes, em Piracicaba e em Araçatuba, SP.

Referências

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2001. 155p.

MIALHE, L. G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Editora Ceres, 1974. 301p.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária brasileira**., Brasília, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA G. C.; CURI, N.; DIAS JUNIOR, M. S. Solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.159-168, 2009.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.921-930, 2006.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O setor sucroenergético no Brasil

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo grande importância para o agronegócio brasileiro. O setor sucroenergético brasileiro, na safra 2014/15, movimentou R\$70 bilhões com a produção de cana-de-açúcar, etanol, açúcar e bioeletricidade, representando 1,3% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, e gerou 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos segundo IEA (2015). Pelo levantamento da CONAB (2016), na safra 2015/2016 a região centro-sul moeu 617,65 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, um crescimento de 8% em relação à safra anterior.

Atualmente a agroindústria canavieira mostra-se muito favorável ao crescimento devido ao esgotamento das jazidas petrolíferas e ao elevado preço do petróleo. Ademais, de modo geral, há conscientização das pessoas em relação ao meio ambiente sobre os efeitos indesejáveis da utilização de combustíveis fósseis no balanço de carbono na atmosfera e aos efeitos desastrosos do aquecimento da superfície terrestre. Nesse contexto, a cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol (CONAB, 2016). Nesse sentido, UNICA (2016) chama a atenção para o fato da produção de etanol ter totalizado 28,22 bilhões de litros na safra 2015/2016, quase 2 bilhões de litros acima da marca histórica. Em relação à produção de açúcar no estado, no período das safras 2006/07 a 2014/15, houve um incremento de 12,8% (IEA, 2015).

Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção têm buscado operar com maior eficiência, inclusive com geração de energia elétrica, auxiliando na redução dos custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade. A fonte biomassa já representa quase 10% da potência outorgada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na matriz elétrica do país. Com referência somente à bioeletricidade da cana-de-açúcar, o setor sucroenergético detém hoje 7,5% da potência outorgada no Brasil e quase 79% da fonte biomassa, sendo a terceira fonte de geração mais importante da matriz elétrica brasileira em termos de capacidade instalada, atrás somente da fonte hídrica e das termelétricas com gás natural (ANEEL, 2016).

A maior produção no país concentra-se na região Centro-Sul, na qual se destaca o Estado de São Paulo, que representou, em 2014, 53,8% da produção nacional de cana-de-açúcar, 49,4% da produção de etanol e 61,6% da produção do açúcar (UNICA, 2015). Segundo o Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), 42,5% das usinas produtoras de açúcar e álcool situam-se no Estado de São Paulo, com 158 unidades industriais (MAPA, 2015).

2.2. Cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta tropical da família das gramíneas, semiperene, com metabolismo fotossintético C4 que possui um grande armazenamento de sacarose nos colmos. A composição química dos colmos varia em função de diversos fatores como: variedade da cultura, idade fisiológica, condições climáticas durante o desenvolvimento e maturação, propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo e tipo de cultivo (BATISTA, 2013).

Segundo BENVENUTI (2005), além da produtividade, outra característica importante das variedades atuais está na existência de espécies com ciclos de crescimento e maturação melhor adaptados às diversas épocas de colheita, o que permite manter a qualidade da matéria-prima entregue à indústria durante todo o período da safra. Em função disso, o cultivo da cana-de-açúcar nas unidades produtoras é caracterizado pelo plantio de um conjunto de variedades classificadas de acordo com sua curva de maturação característica, (HOFFMANN, 1997). São consideradas precoces as variedades cuja colheita é recomendada para o início de safra (maio/junho), média para as colhidas no meio de safra (julho/agosto/setembro) e tardias para as variedades colhidas no fim de safra (outubro/novembro).

O sistema de produção da cultura da cana-de-açúcar é diferenciado e altamente complexo. Neste sistema a produção se inicia com a chamada cana planta, cuja idade no campo geralmente varia de 12 a 18 meses. Após a primeira colheita, a cultura rebrota dando início ao ciclo da chamada cana soca (ou soqueira), a qual é colhida normalmente com 12 meses entre abril e dezembro. As canas socas, em função das condições de cultivo, são colhidas de quatro a cinco vezes atualmente (DIAS, 2016).

De acordo com Silva et al. (2012), a demanda hídrica da cana-de-açúcar é influenciada pelo seu estágio fenológico, pelas condições ambientais, manejo,

período de plantio, variedade e é reduzida com a sucessão de dois ciclos. Gouvêa (2008) afirma que dependendo do clima, a cana-de-açúcar necessita, em média, de 1.500 a 2.500 mm de chuva, uniformemente distribuídos por ciclo vegetativo. Na época de maturação, o ideal é que a precipitação seja menor que no período de crescimento.

2.3. Mecanização e compactação do solo

A compactação dos solos em agrossistemas canavieiros tem sido atribuída principalmente à colheita mecanizada em condições de elevados conteúdos de água no solo (PANKHURST et al., 2003). Assim, a determinação da umidade do solo antes da realização das operações mecanizadas torna-se indispensável, pelo fato desta governar a capacidade de suporte de carga do solo (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999).

O crescimento do setor sucroenergético no estado de São Paulo tem sido sustentado com a utilização intensiva de máquinas e implementos agrícolas (SOUZA et al., 2005). Isso vem contribuindo para o aumento das áreas com problemas de compactação, provavelmente pela ausência de um cronograma de trabalho bem definido ou de modelos capazes de estimar a capacidade de suporte do solo (SOUZA et al., 2006a). Muitas vezes, o preparo do solo e o tráfego de máquinas são realizados sem se levar em conta a umidade do solo, a qual é um fator condicionador da compactação, já que solos úmidos são mais suscetíveis ao processo de adensamento do solo (DIAS JÚNIOR, 2000).

Severiano et al. (2010), modelando a compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar após a colheita manual e mecanizada, observaram que a colheita mecanizada, mesmo sendo realizada na zona de friabilidade do solo, causou compactação enquanto que a colheita manual não promoveu o mesmo efeito.

Diversas pesquisas têm verificado que o acentuado tráfego de máquinas e equipamentos pesados sobre o solo vêm provocando a sua compactação superficial até a profundidade de 0,15 a 0,20 m (HORN et al., 1995; BEUTLER et al., 2001; RICHART et al., 2005; SOUZA et al., 2006b). Segundo Hakansson e Voorhees (1997), sistemas que proporcionam pouco revolvimento do solo e apresentam tráfego de máquinas pesadas, podem promover compactação do solo até 0,40 m, como no sistema de cultivo da cana-de-açúcar.

O intervalo hídrico ótimo (IHO), também conhecido como capacidade de água disponível (CAD), tem como limite superior o conteúdo de água na capacidade de campo na tensão de 0,01 MPa (REICHARDT, 1988), ou o conteúdo de água no qual a porosidade de aeração é de 10%, e como limite inferior o conteúdo de água no ponto de murcha permanente na tensão de 1,5 MPa, ou a resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (SILVA et al., 1994). O conteúdo de água na capacidade de campo tem sido aceito como padrão para determinação da resistência do solo à penetração, sendo, essencialmente, uma referência para o estabelecimento de valores críticos nos quais se pode desenvolver determinada atividade no solo (BENGOUGH et al., 2001).

Roque et al. (2010), ao estudar o efeito do controle de tráfego em áreas cultivadas com cana-de-açúcar na compactação do solo, no sistema de cana colhida mecanicamente sem queima (cana crua), concluiu que as curvas de retenção de água no solo demonstraram um aumento da disponibilidade de água em profundidade e que o intervalo hídrico ótimo permitiu verificar que os manejos com controle de tráfego apresentaram uma melhor disponibilidade de água às culturas. Ainda segundo este autor, para que o desenvolvimento do setor sucroenergético ocorra de maneira sustentável é importante quantificar os níveis de pressão que podem ser aplicados aos solos para evitar a sua compactação, bem como identificar e quantificar os efeitos causados pelo manejo da cultura sobre o solo, de tal maneira que seja possível adaptar as atividades de forma condizente com o desenvolvimento sustentável que se deseja para o setor.

2.4. Balanço hídrico e infiltração de água no solo

2.4.1. Balanço Hídrico

O balanço hídrico climatológico (BHC) foi desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955) para determinar o regime hídrico de um local, sem necessidade de medidas diretas das condições do solo. Para sua elaboração, há necessidade de se definir a capacidade de água disponível (CAD) e de se ter a medida da chuva total, e também a estimativa da evapotranspiração potencial em cada período. Com essas três informações básicas, o BHC permite estimar a evapotranspiração real, a

deficiência ou o excedente hídrico, e o total de água armazenada no solo em cada período.

Castro Neto (2001), avaliando uma metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas, determinou a pressão máxima exercida pelo rodado no solo por meio da determinação da pressão de preconsolidação calculada para os teores de água no solo obtidos a um, dois, quatro e seis dias após a chuva e pressão de contato pneu-solo exercida pelo conjunto trator-implemento e concluiu que esta metodologia poderia ser utilizada no planejamento das operações agrícolas mecanizadas, relacionando-a a informações do balanço hídrico climatológico, ou na recomendação diária destas operações agrícolas mediante o acompanhamento das condições hídricas do solo utilizando o balanço hídrico sequencial.

Ataíde et al. (2012) elaboraram o balanço hídrico sequencial de Thornthwaite e Mather (1955) com evapotranspiração potencial estimada pelo método de Penman-Monteith na avaliação da probabilidade de dias potencialmente úteis de trabalho durante o ano em Londrina, PR, empregando dados meteorológicos do período de 1961 a 2010.

Monteiro et al. (2014) empregaram a contabilização do armazenamento diário de água no solo por meio do balanço hídrico climatológico sequencial diário, utilizando o modelo de Thornthwaite e Mather (1955), no qual a evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Thornthwaite com a temperatura efetiva (Camargo et al., 1997) para avaliação dos dias trabalháveis para o manejo do solo em função da chuva e da disponibilidade hídrica do solo em diferentes regiões brasileiras. No estudo, empregaram dados meteorológicos diários do período compreendido entre 1980 e 2008, considerando-se as variáveis temperatura média do ar (°C) e precipitação pluvial (mm) obtidos para as localidades de Piracicaba, Passo Fundo, RS, Londrina, PR e Dourados, MS.

Estrada et al. (2015) utilizaram o balanço hídrico sequencial diário de acordo com a metodologia descrita por Thornthwaite e Mather (1955), com dados meteorológicos do período de 1993 a 2013 no intuito de construir uma metodologia para estimar o número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas.

2.4.2. Infiltração de água no solo

Brandão et al. (2006) afirmam que a infiltração da água no solo é responsável pela determinação do balanço de água na zona radicular e, por isso, o conhecimento deste processo e de suas relações com os atributos físicos do solo é de fundamental importância para o eficiente manejo e conservação do solo e da água. De acordo com esse mesmo autor, a distribuição de água em um perfil de solo uniforme submetido a uma pequena carga hidráulica na superfície (H_0), pode ser representada esquematicamente pela Figura 2.1.

Figura 2.1 – Perfil de umedecimento do solo durante o processo de infiltração

Fonte: Brandão (2006).

De acordo com a Figura 2.1, a zona de saturação localiza-se abaixo da superfície do solo e é normalmente uma camada estreita, com espessura de aproximadamente 1,5 cm, em que o solo se encontra saturado. A zona de transição, existente entre a zona de saturação e a zona de transmissão, é uma camada caracterizada pelo decréscimo acentuado da umidade, com espessura em torno de 5 cm. Já a zona de transmissão é a região do perfil através da qual a água é translocada.

A textura e a estrutura são características físicas que influenciam mais expressivamente a condutividade hidráulica e a estabilidade dos agregados do solo (Brandão et al., 2006). Por isso, possuem estreita relação com a infiltração de água no solo. Rawls et al. (1996) apresentam valores de taxa de infiltração de solos de

diferentes classes texturais sob condições de cultivo (Tabela 2.1). Tais valores são importantes para analisar o impacto de determinada precipitação para diferentes texturas de solo.

Tabela 2.1 – Taxas de infiltração estáveis de solos de diferentes classes texturais

Textura do solo	Taxa de infiltração estável (mm h ⁻¹)
Areia Franca	38,1 a 94,0
Franco-arenoso	17,8 a 30,5
Franco	10,2 a 27,9
Franco-siltoso	5,1 a 48,3
Franco-argiloso	10,2 a 25,4
Franco-argilo-siltoso	7,6 a 33,0
Argila	5,1

Fonte: North Central Regional Committee 40, citado por Rawls et al. (1996).

Alves e Cabeda (1999) avaliaram a infiltração em um solo Podzólico Vermelho-Escuro sob preparo convencional e plantio direto, usando chuvas simuladas com intensidades médias constantes de 63,0 e 97,0 mm h⁻¹, e verificaram que a taxa de infiltração estável foi maior no plantio direto que no convencional e no plantio direto não houve diferença na taxa de infiltração para duas intensidades. No entanto, no preparo convencional, a taxa foi menor sob a chuva de maior intensidade (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Taxas de infiltração estável no preparo convencional e plantio direto sob duas intensidades de precipitação.

Intensidade de precipitação (mm.h ⁻¹)	Taxa de infiltração estável (mm h ⁻¹)	
	Convencional	Plantio direto
63	27,5	46,6
87	17,3	47,2

Fonte: Alves e Cabeda (1999).

2.5. Determinação dos dias trabalháveis

Segundo Rotz e Harrigan (2005), diversos modelos para a seleção otimizada de máquinas e conjuntos motomecanizados foram desenvolvidos sendo que em cada um destes tipos, o número de dias adequados para o trabalho de campo é um componente importante na seleção e análise de sistemas de máquinas. A fim de prever a quantidade de trabalho que pode ser realizado, o tempo disponível durante o período ótimo para a operação necessária deve ser conhecido. O tempo disponível

varia consideravelmente de ano para ano de acordo com a variação das condições meteorológicas.

Tulu et al. (1974), citados por Castro Neto (2001), comentam que a disponibilidade de dias trabalháveis é influenciada pelo clima e pelo tipo de solo e foi considerada como um dos fatores responsáveis pela alteração do custo de produção do milho entre o preparo do solo e o plantio.

O conhecimento do número de dias trabalháveis em operações com máquinas agrícolas é importante para calcular o tempo disponível para a operação, permitindo o planejamento em relação ao manejo da área (CASTRO NETO, 2001). Ainda segundo Castro Neto (2001), a possibilidade de tráfego de máquinas em uma área está associada à ocorrência de chuva ou irrigação, aos fatores relacionados ao clima, ao tipo de operação a ser realizada, ao peso das máquinas e dimensões do rodado e, também, às características físico-hídricas do solo.

Devido ao fato do alto teor de água no solo influenciar negativamente as operações com máquinas agrícolas, diversos estudos foram desenvolvidos para se determinar a probabilidade de ocorrência de dias trabalháveis com máquinas agrícolas (Assis et al., 1989), de modo a subsidiar as tomadas de decisão e minimizar os impactos ao solo.

Castro Neto (2001) chama a atenção para o fato de que havendo disponibilidade de uma longa série de dados meteorológicos, é importante que se faça estudos climatológicos calculando-se o balanço de água no solo e classificando os dias como aptos e inaptos para as diversas atividades motomecanizadas em função do tipo de solo.

Para Souza et al. (1992) um dia favorável ao trabalho de campo é definido quando a água disponível no solo é igual ou menor que 90% da disponibilidade total nos primeiros 15 cm de solo, enquanto que um dia com 5 mm ou mais de chuva foi considerado como desfavorável para as operações de campo, independente da quantidade de água disponível nos 15 cm de solo.

Castro Neto (2001), objetivando desenvolver e avaliar o desempenho de equipamentos e metodologia para a determinação de parâmetros físicos do solo relacionados aos dias trabalháveis com máquinas agrícolas, determinou tais parâmetros para previsão e monitoramento das condições de trafegabilidade do solo que pudessem ser incorporadas a modelos agrometeorológicos com a finalidade de identificar o número de dias trabalháveis. Na determinação dos parâmetros físicos,

desenvolveu um modelo para a determinação da pressão de contato pneu-solo com base nas características do rodado, obtidas pelo seu coeficiente de deformação e pela sua largura relativa, e nas características de recalque do solo, representadas pelo módulo de deformação devido à coesão, módulo de deformação resultante do atrito interno e da constante de deformação do solo. A pressão máxima exercida pelo rodado, antes que houvesse uma compactação adicional, foi caracterizada pela pressão de preconsolidação. Concluiu que houve um incremento médio de 185% na resistência média à penetração para tráfego a um, dois e quatro dias após a chuva e foi sensível para detectar a diferença para o tráfego realizado seis dias após a chuva, coincidindo com os resultados da pressão de preconsolidação.

Selirio e Brown (1972), citados por Castro Neto (2001), após dois anos de medições de umidade no solo e observações sobre as condições de trabalho observaram que as operações com máquinas é possível quando o teor de água no solo é igual ou menor que 90% da capacidade de campo à profundidade de 12 cm, independente do teor de água nas camadas mais profundas.

Von Barga et al. (1986) determinaram a disponibilidade de dias trabalháveis em 14 localidades do centro-leste de Nebraska, EUA, adotando critérios variáveis de acordo com a textura do solo para considerar um dia como trabalhável. De acordo com esses autores, o solo se encontra em condições favoráveis de manejo quando em solos leves a percentagem da capacidade de campo na camada de 0 a 5 cm for $\leq 92,3\%$ e na camada de 5 a 10 cm for $\leq 98,5\%$. Para solos de textura média, esses autores sugeriram se considerar os limiares de 90,7% e 96,5% para as camadas de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente, enquanto que para solos pesados esses limiares caíram para 87% e 92%.

Ao longo dos anos, diversos trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de se determinar a quantidade de dias efetivamente aptos ao trabalho com máquinas agrícolas, os quais foram citados por Castro Neto (2001) e são apresentados na Tabela 2.3.

Rotz e Harrigan (2005) desenvolveram um modelo para verificar o número de dias adequados a colheita a partir de registros climáticos de longo prazo e as características do solo de um local. Este modelo utilizou dados climáticos entre 1960 e 1980 para o estado de Indiana, considerando uma variação entre 80% e 90 % dos valores prováveis para os dias adequados em cada mês. Esses autores observaram que a avaliação das condições de trabalhabilidade do solo sob influência do clima

resultou em melhores condições de manejo do solo do que quando se considerou apenas o tipo de solo.

Ataíde et al. (2012), estimando as probabilidades de dias úteis de trabalho em campo e a trafegabilidade de maquinários para o município de Londrina, PR, observaram que o melhor período para realização de trabalhos com máquinas em Londrina se estende de abril a setembro, com o período ótimo ocorrendo entre final de julho e início de setembro. Além disso, as maiores probabilidades de um dia ser favorável à execução de práticas mecanizadas no campo compreendem o mês de abril e os meses de junho a agosto. Os dias favoráveis ao trabalho com máquinas no campo foram estabelecidos como aqueles em que os valores de armazenamento de água no solo eram iguais ou inferiores a 90% da capacidade de água disponível na camada superficial de 30 cm do solo e a precipitação menor que 5 mm.

Shahbazi e Jafarzadeh (2010) realizaram um estudo considerando parâmetros do solo associados à chuva de forma a determinar o tempo de trabalhabilidade relacionado com a gestão territorial. Para tanto, empregaram um modelo estatístico chamado Aljarafe com um framework chamado MicroLEIS DSS automatizando a aplicação de procedimentos que utilizam dados do solo usados para prever a umidade e o tempo de trabalhabilidade. O modelo estatístico Aljarafe avaliou a distribuição de tamanho de partículas do solo, capacidade de troca catiônica, e teor de matéria orgânica de forma a estimar a umidade ideal e o tempo de trabalhabilidade. O modelo foi aplicado na região de Souma, oeste do Azerbaijão. Os resultados foram espacializados criando três classes de plasticidade do solo (muito baixa, baixa e alta) que refletiam a trabalhabilidade, ou seja, quanto maior a plasticidade do solo maior a trabalhabilidade. Dessa forma, concluiu-se que a maior área avaliada na região de Souma estava dentro da classe de plasticidade muito baixa e, portanto, com baixo percentual de trabalhabilidade do solo. Os autores comentam que a integração dos resultados com GIS foi útil para criar mapas georreferenciados que facilitam as interpretações das informações.

Tabela 2.3 – Condições de capacidade de campo, profundidade do solo e quantidade de chuva consideradas para a determinação dos dias trabalháveis. Adaptado de Castro Neto (2001).

Autores	Considera-se dia trabalhável		
	Capacidade de campo	Profundidade do solo	Quantidade chuva
Morey et al., citado por Hassan e Broughton (1975)	< 95%	0 a 15 cm	< 2,5 mm
Frisby (1970)	≤ 100%		
Earl (1997)		0 a 15 cm	Trafegabilidade: 5 a 20 mm Trabalhabilidade: 10 a 30 mm
Sedyama et al. (1979)	< 90%	0 a 15 cm	
Agendes e Mota (1986)	< 84% CAD	0 a 12cm	
Elliot et al. (1977)	< 80% - Solos barro-siltosos < 90% - barro-arenosos	Camada superior do perfil	≤ 5,1 mm
Bolton citado por Assis (1988)	70 a 80%		
Nath e Johnson citado por Afférri (1992)	< 85%	0 a 15 cm	
Rumsey e Torres (1989)			< 6,4 mm ou < 2,5 mm sendo o dia anterior chuvoso
Assis (1988)		0 a 15 cm	≤ 5,0 mm ≤ 10 mm no dia anterior
Acharya e Brown citado por Von Barga et al. (1986)	< 95%	0 a 12 cm	< 3,8 mm
Fernandes (1996)	≤ 90%		≤ 5,0 mm ou < 0,2 mm no dia sendo o dia anterior ≤ 2,0 mm ou chuva do dia anterior ≤ 10,0 mm
Erthal e Sentelhas (1995)	40 a 90% CAD		< 5,0 mm
Monteiro et al. (2011)	40 a 90% CAD		< 5,0 mm
Ataíde et al. (2012)	90% CAD	0 a 30 cm	< 5,0 mm
Monteiro et al. (2014)	40 a 90% CAD		< 5,0 mm
Estrada et al. (2015)	40 a 90% CAD		< 5,0 mm

Toro e Hansson (2004) desenvolveram um modelo de simulação baseado nas características físicas do solo, da precipitação local e dos dados da operação com máquinas a ser realizada no campo. Utilizaram uma técnica de simulação de eventos discretos a fim de analisar o desempenho das máquinas com base no *status* diário de trabalhabilidade do solo (condições ideais para a realização de uma dada operação de campo com máquinas agrícolas) para uma série de anos e compararam os resultados com os de um método mais simples com base em valores médios de probabilidade de dias trabalháveis disponíveis para as operações com máquinas ao longo do ano além de validação com dados reais. Concluíram que os custos de máquinas eram o principal componente dos custos totais e, como esperado, aumentavam em função do tamanho da máquina. O método de valores médios de probabilidade de dias trabalháveis, apesar de simples de ser empregado, gerou resultados considerados não satisfatórios para os autores comparado ao método diário de trabalhabilidade.

De acordo com o estudo de Toro e Hansson (2004), a seguinte representação esquemática deve ser empregada para determinação da probabilidade de dias trabalháveis (Figura 2.2):

Figura 2.2 - Representação esquemática das abordagens para estimar os custos de máquinas com o método da probabilidade média de dias trabalháveis e o método do estado de trabalhabilidade diária

Referências

- AFFÉRRI, A.Z. **Estimativa das condições de tráfego em solo agrícola**. Piracicaba, 1992. 118p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Área de Concentração: Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- AGENDES, M. O.; MOTA, F. S. **Dias climaticamente aptos para trabalhar com máquinas agrícolas em planossolo bem drenado artificialmente, em Pelotas**. Pelotas, 1986, 14p. Boletim de pesquisa nº 1.
- ALVES, M. C.; CABEDA, M. S. V. Infiltração em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.753-61, 1999.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Informações Gerenciais**. Brasília. 73p. 2016.
- ASSIS, S.V. **Modelo para estimar o número de dias trabalháveis com tratores agrícolas, em função de parâmetros do solo e do clima**. Viçosa, 1988, 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa.
- ASSIS, S.. V.; SEDIYAMA. G. C.; VIANELLO, R.. L.; MARTYN, P. J. Probabilidade de ocorrência de dias trabalháveis com tratores agrícolas em Uberaba, Minas Gerais. **Revista Ceres**, v. 36(206), p. 299-316, 1989.
- ATAÍDE, L. T.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; SILVA D. A. B.; SOUZA, J. R. P. The probability of potentially useful work days during the year in Londrina. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 6, p. 2215-2226, nov./dez. 2012.
- BATISTA, L. M. T. **Avaliação Morfofisiológica da Cana de Açúcar Sob Diferentes Regimes Hídricos**. 2013. 125p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J.; O'SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (eds). **Soil environmental analysis: physical methods**. 2.ed. Marcel Decher, 2001. p.377-403.
- BENVENUTI, F. A. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos**. 2005. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.M.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.167-177, 2001.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo**. 3. Ed. Atual. e ampl. Viçosa: Editora UFV, 2006. 120p.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2001. 155p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar**. Brasília, v. 2, n.4, p.1-76, 2016.

DIAS, F. L. F.; MAZZSA, J. A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R. F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23. p.627-634, 1999.

DIAS, H. B. **Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil**. 2016. 166p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, v.1, p.55-95, 2000.

EARL, E. Prediction of trafficability and workability from soil moisture deficit. **Soil & Tillage Res.**, v.40, p.155-168, 1997.

ELLIOT, R. L.; LEMBKE, W. D.; HUNT, D.R. A simulation model for predicting available days for soil tillage. **Transactions ASAE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)**, v.20, n.8, p.4-8, 1977.

ERTHAL, L. C.; SENTELHAS, P. C. Probabilidade da sequência de dias secos em Campinas (SP) como subsídio ao planejamento do uso de máquinas agrícolas. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 9., 1995, Campina Grande, PB. Anais... Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995. p. 409-411.

ESTRADA, J. S.; SCHLOSSER, J. F.; FARIAS, M. S.; SANTOS, G. O.; RÜDELL, I, Y. P. Metodologia para estimar o número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 62, n.4, p. 410-414, jul-ago, 2015.

FERNANDES, H.C. **Máquinas de exploração florestal: compactação das trilhas e dias potencialmente úteis para o trabalho**. Botucatu, 1996. 145p. Tese(doutorado em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

FRISBY, J. C. Estimating good working days available for tillage in Central Missouri. **Transactions ASAE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)**, v.13, p.641-643, 1970.

GABRIEL, K.R.; NEUMANN, J. A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.88, p.90-95, 1962.

GOUVÊA, J. R. F. **Mudanças Climáticas e a Expectativa de seus Impactos na Cultura da Cana de Açúcar na Região de Piracicaba, SP**. 2008. 98p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, 1997. p.167-179.

HASSAN, A. E. BROUGHTON, R. S. Soil moisture criteria for tractability. **Canadian Agricultural Engineer**, v.17, n.2,p.124-129, 1975.

HOFFMANN, P. H. **Evolução do potencial produtivo das principais variedades de cana-de-açúcar cultivadas no estado de São Paulo nos últimos cinquenta anos**. 97p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil and Tillage Research**, v.35, n.1-2, p.23-36, 1995.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA – IEA. **Análise e Indicadores do Agronegócio: Diagnóstico do Setor Sucroenergético em 2014**. v. 10, n. 10, outubro 2015

KONDO, M.K.; DIAS JÚNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa - MG, v.23, n.2, p.211-218, 1999.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Relação de instituições cadastradas no departamento de cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília: MAPA, 2015. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/agroenergia/estatistica>. Acesso em: 19 ago. 2015.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PIEDADE, S. M. S. Probabilidade de sequência de dias trabalháveis com máquinas como subsídio ao planejamento de operações agrícolas na região de Piracicaba, SP. **XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia** – Julho de 2011 – SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari – ES. 2011. 5p.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PIEDADE, S. M. S. Dias trabalháveis para o manejo do solo em função da chuva e da disponibilidade hídrica do solo em diferentes regiões brasileiras. **Revista Ambiente & Água**. v. 9, n. 3, Taubaté, 2014.

PANKHURST, C.E.; MAGAREY, R.C.; STIRLING, G.R.; BLAIR, B.L.; BELL, M.J.; GARSIDE, A.L. Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.72, n.2, p.125-137, 2003.

RAWLS, W. J. DAVID, G.; van MULLEN, J. A.; WARD, T. J. Infiltration. In: ASCE. **Hidrology handbook**. 2.ed. New York: [s.n.], 1996. p.75-124. (ASCE Manual and Report on Engineering Practice, 28).

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.3, p.211-216, 1988.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, Londrina, v.26, n.3, p.321-344, 2005.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

ROTZ, C. A.; HARRIGAN, T. M. Predicting suitable days for field machinery operations in a whole farm simulation. Applied Engineering in Agriculture. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 21, n. 4. 2005.

RUMSEY, J.W., TORRES, D.de. Soil trafficability in California loam soils. New Orleans: **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 1989. 12p. (Paper, 89-1547)

SEDIYAMA, G. C.; PRUITT, W. O.; COSTA, J. M. N.; BERNARDO, S. Modelo para computação da irrigação suplementar e do número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas na produção da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Revista Ceres**, v.26, n.145, p.238-250, 1979.

SELIRIO, I. S.; BROWN, D. M. Estimation of spring workdays from climatological records. **Canadian Agricultural Engineer**, v.14, n.2, p.79-81, 1972.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA G. C.; CURI, N.; DIAS JUNIOR, M. S. Solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.159-168, 2009.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CASTRO, M. B. OLIVEIRA, L. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.404-413, 2010.

SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**, 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, ABRH EDUSP, 2000. P.335-72.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.921-930, 2006.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, C. L.; KATO, E. Avaliação de modelos para previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.33, n.7, p.1149-1158, 1998.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; JÚNIOR, W. G. F. Requerimento Hídrico e Coeficiente de Cultura da Cana de Açúcar Irrigada no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**. Campina Grande. Volume 16, n. 1, p. 64-71, 2012.

SHAHBAZI, F.; JAFARZADEH, A. A. Land management planning concerning to workability timing of soil in Souma area, using Aljarafe model. **19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World**. 1 - 6 August. 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.

SOUZA, A.; ASSIS, S. V.; OLIVEIRA, C. R.; LAURETTO, M. Modelo para estimar o número de dias trabalháveis com tratores agrícolas. **Lavoura Arrozeira**, v.45, n.401, p.8-12, 1992.

SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S.P.; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, 2005.

SOUZA, Z.M.; BEUTLER, A.N.; PRADO, R.M.; BENTO, M.J.C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, Jaboticabal, v.34, n.1, p.31-38, 2006a.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G.T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.487-492, 2006b.

THORNTON, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (**Publications in Climatology**, vol. VIII, n.1)

TORO, A.; HANSSON, P. A. Analysis of field machinery performance based on daily soil workability status using discrete event simulation or on average workday probability. **Agricultural Systems**. p.109–129. v. 79, 2004.

UNICA, União da Indústria de Cana-de-açúcar. **Setor Sucroenergético**. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/>. Acesso em: 02-04-2014.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR - UNICA. **Banco de dados**. São Paulo: UNICA. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/index.php?idioma=1>>. Acesso em: 3 set. 2015.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR - UNICA. **Notícias do Setor**. São Paulo: UNICA. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/41597945920320868796/safra-encerrada-no-centro-sul-atinge-617-por-cento2C65-milhoes-de-toneladas/>>. Acesso em: 22 dez. 2016.

VON BARGEN, K.; MENG, J.; SCHROEDER, M. A. Field working time for agricultural equipment management in Nebraska. San Luis Obispo: **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 1986. 17p. p.86-124.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DE DIAS TRABALHÁVEIS PARA COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

Resumo

A determinação do número de dias trabalháveis (NDT) para a colheita da cana-de-açúcar é uma variável fundamental para o dimensionamento da frota de colhedoras, assim como para a determinação da eficiência de tal operação. No entanto, para que o NDT seja determinado de forma acurada para uma determinada região há a necessidade de se definir os critérios a serem adotadas para tanto. Considerando-se a importância desses critérios agrometeorológicos para se minimizar os erros na determinação do NDT, o presente estudo teve por objetivo avaliar diferentes critérios de chuva (PREC), capacidade de água disponível (CAD) e da relação entre o armazenamento de água no solo e a CAD (ARM/CAD) para a definição do NDT para a colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Para tanto, foram coletados dados de horas de interrupção da colheita por causa da chuva de 30 usinas distribuídas no estado, pertencentes a diferentes empresas, com os dados de horas paradas variando de duas a cinco safras. Após a determinação do número de dias trabalháveis ocorridos por mês em cada usina/safra, foram simuladas 27 combinações para estimação do número de dias trabalháveis empregando-se os seguintes critérios agrometeorológicos: PREC de 3 mm, 5 mm e 7 mm; CAD de 40, 80 e 120 mm; e ARM/CAD de 70%, 80% e 90%. Para avaliar estatisticamente o desempenho dos modelos, correlacionou-se os valores de NDT estimados com os observados, tomando-se como base os indicadores estatísticos, erro médio (EM), erro absoluto médio (EAM), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice de desempenho de Camargo-Sentelhas (C). Após definido os critérios de melhor desempenho para a determinação do NDT, esses foram regionalizados por meio do método Voronoi, utilizando-se o programa *Open Source QuantumGIS* (QGIS). De modo a facilitar a determinação do NDT e minimizar o menor EAM de cada parâmetro determinou-se um critério geral para todo o estado. Com os critérios regionais e geral foram feitas as validações dos mesmos, as quais foram avaliadas por meio dos erros e índices estáticos já mencionados. Para tanto, foram selecionados 15 municípios dos 23 analisados para os quais foram obtidos novos dados de NDT observados, assim como novos dados agrometeorológicos para o ano de 2015, os quais não foram utilizados na definição dos critérios, ou seja, dados independentes para o processo de validação. Dessa forma, para o ano 2015 foi determinado o NDT com base no melhor critério regional e geral para cada um dos 15 municípios, dados que foram comparados com os observados para o mesmo período. Os resultados indicaram variação regional para os critérios de determinação do NDT, sendo os melhores

sempre associados à CAD de 40 mm, havendo, assim, variação nos critérios de PREC e ARM/CAD. A adoção dos critérios regionais gerou um EAM de 3,8 dias na fase de validação. Para o critério geral, a melhor combinação foi para CAD = 40 mm, PREC = 3 mm e ARM/CAD = 90%, gerando um EAM de 4,4 dias na fase de validação. Com base nesses resultados, conclui-se que a estimativa do NDT com base em critérios agrometeorológicos se mostrou uma ferramenta útil e de baixa complexidade, podendo ser determinado tanto por critérios regionalizados como pelo geral, com erros absolutos médios da ordem de 4 dias.

Palavras-chave: Critérios agrometeorológicos; Operações de campo; Capacidade de água disponível; Dimensionamento de frota

Abstract

The determination of the number of workable days (NWD) for sugarcane harvest is an important variable for the dimensioning harvest machines, as well as for determining the efficiency of such operation. However, in order for NWD to be accurately determined for a given region, it is necessary to define the climate and soil criteria to be adopted for this purpose. Considering the importance of these agrometeorological criteria to minimize errors in the determination of NWD, the present study had the objective of evaluating different rainfall (PREC), soil water holding capacity (SWHC) and the relationship between soil water storage and SWHC (ARM/SWHC) for defining NWD for the sugarcane harvest in the state of São Paulo. For that, data of harvest interruption caused by rainfall was collected from 30 sugar mills distributed in the state, belonging to different companies, with the series ranging from two to five harvest years. After determining the number of workable days per month in each mill/season, 27 combinations were simulated to estimate the number of workable days using the following agrometeorological criteria: PREC of 3, 5 and 7 mm; SWHC of 40, 80 and 120 mm; and ARM/SWHC of 70%, 80% and 90%. In order to statistically evaluate the performance of the models, the estimated NWD values were correlated with those observed, based on the following statistical indicators: mean error (ME); mean absolute error (MAE); Willmott's concordance index (d); coefficient of determination (R^2), Pearson correlation coefficient (r); and performance index of Camargo-Sentelhas (C). After defining the best performance criteria for NWD determination, it was regionalized using the Voronoi method using the Open Source QuantumGIS (QGIS) program. In order to facilitate the determination of NWD and to minimize the lowest MAE of each parameter, general criteria were determined for the whole state. With the regional and general criteria, the validations were performed through the same statistical indices and errors already mentioned. For that, 15 locations were selected from the 23 analyzed for which new NWD was obtained, as

well as new agrometeorological data for the year 2015, which was not used in the definition of the criteria, that is, independent data for the validation process. Thus, for the year 2015 NWD was determined based on the best regional and general criteria for each of the 15 locations, with estimates being compared with observed data for the same period. The results indicated regional variation for the criteria for NWD determination, with the best being associated to SWHC of 40 mm but with variations for PREC and ARM/SWHC criteria. The adoption of the regional criteria generated a MAE of 3.8 days in the validation phase. For the general criteria, the best combination was for SWHC = 40 mm, PREC = 3 mm and ARM/SWHC = 90%, with a MAE of 4.4 days in the validation phase. Based on these results, it was concluded that the estimation of NWD based on agrometeorological criteria has proved to be a useful and low complexity tool, which can be determined either by regionalized or general criteria, with mean absolute errors of about 4 days.

Keywords: Agrometeorological criteria; Field operations; Water capacity available; Fleet size

3.1. Introdução

A constatação de que um dia é tido como operacionalmente útil para operações de campo tem sido assumida com base nas condições meteorológicas, especialmente chuva, e na faixa de umidade do solo, determinada pelo balanço hídrico, que possibilite o tráfego do trator e a atuação plena e satisfatória dos órgãos ativos da máquina ou implemento utilizado. Dependendo da operação a ser realizada, o trânsito sobre o solo agrícola pode se restringir apenas à condição de ação do rodado sobre o solo, ou vir acompanhado da ação de um órgão ativo de movimentação do solo (CASTRO NETO, 2001).

Em estudos nos quais são empregadas bases longas de dados meteorológicos, é importante se atentar para como estes dados foram obtidos, a confiabilidade da fonte geradora dos dados, bem como a metodologia que foi empregada para preenchimento de dados faltantes, uma vez que este processo de preenchimento é muito comum em séries longas de dados meteorológicos.

Para se ter uma ideia da importância das bases de dados meteorológicos, (ZANDONADI; PASCOALINO, 2012), estudando a distribuição espaço-temporal das chuvas nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, realizaram busca de todos os postos pluviométricos disponíveis na área de estudo e passíveis de terem

seus dados utilizados na análise proposta, consideraram que no levantamento dos postos pertencentes ao Instituto Agrônomo de Campinas havia má distribuição dos postos na área de estudo de maneira que em algumas áreas das bacias havia grande concentração de postos enquanto em outras a concentração era muito pequena ou inexistente. Para corrigir este problema buscaram dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo que, segundo os autores, mostrou ser de melhor qualidade e com distribuição mais uniforme.

Nessa linha, Salvador e Santos (2010) comentam que uma das dificuldades encontradas nas pesquisas agroclimáticas é a de se reunir um conjunto consistente de dados de longo período sem ou com poucas falhas. Dados de natureza temporal, como os dados meteorológicos, são constantemente comprometidos pela ocorrência de dados faltantes, uma vez que a não observação de determinada variável pode ser consequência da falta do observador, de uma medição incorreta por parte do instrumento de medição ou mesmo do seu não funcionamento.

A falta de uma dada observação, ou ainda de várias, é comumente contornada utilizando-se como base para o estudo apenas o banco completo, ou seja, apenas os dados observados. Entretanto, tal análise é incorreta já que a série temporal em estudo é considerada uma amostra dentre todas as possíveis ocorrências climáticas no local e a perda de informações reduz a amostra, diminuindo, por conseguinte, o poder estatístico do estudo, o que justifica a utilização de métodos de imputação ou preenchimento de falhas (NUNES et al., 2009).

De forma a contornar o problema de falhas em série longas de dados meteorológicos, diversos autores vêm empregando dados de grade provenientes de satélite e outras bases, como os dados fornecidos pelo sistema NASA/POWER (WHITE et al., 2008; MONTEIRO, 2015).

Monteiro (2015) comparou os dados do NASA/POWER com estações terrestres do INMET para diversos locais do Brasil. Foram avaliados, por meio do coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância (d), erro médio (EM) e raiz quadrada do erro médio (RQEM), os dados de temperatura máxima, mínima e média, evapotranspiração de referência, horas efetivas de sol e precipitação. Concluiu que houve uma concordância média de 80% entre os dados do NASA/POWER e do INMET.

Segundo Brisson et al. (1992), o uso de modelos agrometeorológicos de simulação na agricultura é muitas vezes limitado por falhas nos dados meteorológicos, especialmente em relação ao balanço hídrico do solo.

Thomasson e Jones (1991), avaliando uma abordagem empírica à modelagem de culturas e à avaliação da produtividade, comentaram que a atividade de construção de modelos é comumente uma tentativa de descrever um sistema inteiro a partir de simplificações e de dados incompletos.

As terras designadas ao cultivo de uma determinada cultura sob sistema de produção mecanizado podem geralmente ser excluídas por fatores bastante simples como inclinação do terreno, baixa temperatura, excesso de umidade no solo ou presença de afloramentos rochosos. Tendo excluído terras inadequadas, o grau de adequação ou produtividade potencial de uma cultura é determinado principalmente pela oportunidade de estabelecer e colher a cultura. No caso da colheita, o período em que a mesma poderá ser realizada é denominado como o número de dias potenciais de trabalho de máquinas ou, simplesmente, número de dias trabalháveis (NDT) para as operações de campo, o que é definido pelas condições do clima (chuva) e da disponibilidade de água no solo em função da textura deste (THOMASSON; JONES, 1991). Esses parâmetros definem as condições de trabalhabilidade e trafegabilidade em solos agrícolas. A Figura 3.1 apresenta o fluxo de informações necessárias para a avaliação da trabalhabilidade e da trafegabilidade em solos agrícolas. O período meteorológico no qual há déficit de umidade no solo é usado como uma primeira aproximação para definir os limites da atividade de máquinas no terreno. Modificadores envolvendo a retenção de água do solo, permeabilidade, profundidade da água e medidas de drenagem são então introduzidos no modelo. O efeito destes agentes pode ser o de restringir ainda mais (solos pesados) ou aumentar (solos leves) a trabalhabilidade (THOMASSON, 1982; THOMASSON, JONES 1988; THOMASSON, JONES, 1989).

Figura 3.1 – Fluxo de informações para avaliação da trafegabilidade e da trabalhabilidade em solos agrícolas

Fonte: Thomasson e Jones (1991)

O tempo meteorológico impõe restrições quanto ao tempo disponível para a realização de operações de campo durante o outono, inverno e primavera por causa de problemas que surgem quando máquinas pesadas operam em solo úmido com baixa resistência de rolamento (COOPER et al., 1997).

No atual modelo de agricultura, é indispensável que o produtor conheça a real disponibilidade de tempo para a execução das operações agrícolas de campo ao longo do ciclo das culturas. Este é o primeiro passo para se planejar e se obter maior eficiência na execução dessas operações, que estão sujeitas às variações das condições meteorológicas, especialmente do regime de chuvas. A chuva e sua influência na umidade do solo em uma determinada região influenciam diretamente o número de dias disponíveis para trabalhar com máquinas agrícolas (ESTRADA et al., 2015).

Carvalho et al. (2009) afirmam que simples análises empíricas de períodos secos em séries de precipitação de longo prazo fornecem informações úteis para diversas aplicações agrícolas. A duração dos períodos secos é uma variável importante na definição das estratégias de manejo de culturas agrícolas como, por

exemplo, planejamento da colheita, aplicação de fertilizantes e controle fitossanitário.

Ahaneku e Onwualu (2007) desenvolveram um modelo de simulação para prever o número de dias trabalháveis de campo adequados para operações de lavoura no Norte da Nigéria Central. As previsões foram feitas a partir de um modelo que simula a umidade do solo diária nos 30 cm de profundidade do solo usando 6 anos de registros meteorológicos diários. O modelo foi testado e validado comparando seus resultados com os dias de trabalho observados durante a safra de 1996 em dois tipos de solo. Segundo os autores, os resultados mostraram que houve boa concordância entre os valores observados e preditos utilizando os critérios nos quais houve trabalhabilidade quando, avaliando uma camada de 30 cm de solo, o armazenamento de água no solo foi menor que 95% da capacidade de água disponível e a precipitação do dia foi menor que 5 mm.

Ataíde et al. (2012), estimando as probabilidades de dias úteis de trabalho em campo e a trafegabilidade de maquinários para o município de Londrina, PR, estabeleceram como critérios para o dia ser trabalhável o armazenamento de água no solo igual ou inferior a 90% da capacidade de água disponível na camada superficial de 30 cm do solo e a precipitação menor que 5 mm. Observaram que o melhor período para realização de trabalhos com máquinas em Londrina se estende de abril a setembro, com o período ótimo ocorrendo entre final de julho e início de setembro. Além disso, as maiores probabilidades de um dia ser favorável à execução de práticas mecanizadas no campo compreendem o mês de abril e os meses de junho a agosto.

Cooper et al. (1997) estudaram a influência de mudanças climáticas na trabalhabilidade do solo e disponibilidade de dias trabalháveis na Escócia utilizando um modelo de simulação de água e de calor do solo para prever o efeito de cenários climáticos alterados sobre o número de dias de trabalho disponíveis no Outono, Inverno e Primavera (1 de Setembro a 30 de Abril) com diferentes tipos de solo e em quatro regiões da Escócia. Os resultados mostraram uma redução substancial no número de dias de trabalho disponíveis no clima alterado devido ao aumento esperado das chuvas inverniais.

Quando se trabalha com modelos agrometeorológicos empíricos, é sempre importante que o mesmo seja desenvolvido para que possa ser utilizado em diversos locais. Nesse sentido, é importante se definir a área de abrangência em que o

modelo é confiável. Florez et al. (2013), estudando modelos de estimação da temperatura do ar no Valle del Cauca, Colômbia, observaram que o uso do método de Voronoi é uma alternativa muito eficaz e prática para a interpolação e definição da área de influência de cada estação meteorológica.

Salles (2010), aplicando um sistema de informação geográfica (SIG) na análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio São João, em Minas Gerais, observou que os métodos de interpolação do Inverso do Quadrado da Distância e de Voronoi representaram satisfatoriamente o parâmetro analisado, sendo que o método de Voronoi individualizou um maior número de áreas de influência. Segundo Salles (2010), ao permitir a delimitação exata de áreas de influência, o método de interpolação de Voronoi favorece a otimização das investigações de campo.

Diversos estudos relatam metodologias para a determinação do número de dias trabalháveis (Tabela 2.3), no entanto, na maioria dos casos esses são de aplicação regional e nem sempre foram validados com dados observados a campo. Além disso, o estado de São Paulo não possui análise completa sobre a determinação do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, o que enfatiza a importância de um estudo dessa natureza, de modo a subsidiar o planejamento da colheita mecanizada pelas diversas usinas do setor sucroenergético que estão instaladas no estado. Sendo assim, a hipótese deste estudo é de que é possível desenvolver critérios específicos e/ou geral para a definição no número de dias trabalháveis para a realização da colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, a partir de dados meteorológicos e de informações do tipo de solo e do balanço hídrico. Desse modo, o objetivo deste estudo foi determinar os critérios agrometeorológicos, específicos e geral, para a estimação do número de dias trabalháveis (NDT) para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo e validar esses critérios comparando o NDT estimado com os valores observados em usinas de cana-de-açúcar em diferentes regiões do estado de São Paulo.

3.2. Material e Métodos

Na escolha do melhor critério agrometeorológico para determinação do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, foram coletados dados de horas de interrupção da moagem

por motivo de chuva de 30 usinas distribuídas no estado (Figura 3.2). As horas de interrupção da moagem por chuva são apontadas pela indústria, no entanto, esse tipo de parada só ocorre quando há interrupção da colheita no campo. Sendo assim, assumiu-se que a interrupção da moagem na usina representou a paralização da colheita no campo, assim como o retorno da moagem representou a retomada das atividades de colheita mecanizada no campo.

Como se trataram de diversas usinas pertencentes a diferentes empresas, os dados de horas paradas corresponderam a séries que variaram de dois a cinco anos, dependendo da empresa.

A Figura 3.2 apresenta a distribuição das usinas que forneceram os dados de interrupção da moagem por chuva. Observa-se que há uma excelente distribuição dessas usinas, representando a grande maioria das áreas produtoras do estado de São Paulo.

Figura 3.2 – Distribuição das usinas que forneceram os dados de interrupção da moagem por chuva no estado de São Paulo

Na Figura 3.2 nota-se que são apresentados 23 localidades onde as usinas estão situadas, o que se justifica por haver municípios que sediam mais do que uma usina. Como em muitos casos, as localidades não apresentavam base de dados meteorológicos com 32 anos de dados diários contínuos, empregou-se a metodologia de preenchimento de dados faltantes por meio do vizinho mais próximo (GARCIA et al., 2006).

Os dados diários de horas paradas por chuva foram agrupados em horas mensais. Após a somatória de horas totais mensais com paradas por chuva, estas foram divididas por 24 horas a fim de se determinar no mês quantos dias equivalentes não foram trabalháveis devido à ocorrência de chuva e de alta umidade no solo. A determinação do número de dias trabalháveis no mês se deu pela subtração dos dias totais corridos de safra para cada mês em relação aos dias parados por chuva. Esses dados receberam a nomenclatura de dados observados (OBS).

Para o desenvolvimento do modelo agrometeorológico que estimasse o número de dias trabalháveis fez-se necessária a determinação do balanço hídrico climatológico sequencial (BHSeq), uma vez que esta é uma ferramenta que permite determinar o conteúdo de água no solo (ou armazenamento) em um determinado dia, de acordo com o método de (THORNTHWAITE; MATHER, 1955). Sendo assim, o BHSeq diário foi elaborado para a série histórica de 1983 a 2014 (32 anos), para todas as localidades apresentadas na Figura 3.2.

Os dados de chuva foram obtidos das estações do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo) no site <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/> (ZANDONADI; PASCOALINO, 2012). Para séries tão longas de dados e em alguns municípios houve a necessidade de preenchimento de dados faltantes, que foi realizado obtendo-se os dados referentes ao mesmo dia nas demais estações do mesmo município ou nas estações de municípios vizinhos próximos (GARCIA et al., 2006; SALVADOR; SANTOS, 2010; NUNES et al., 2009; ZANDONADI; PASCOALINO, 2012).

Os demais elementos meteorológicos diários necessários para a elaboração do BHSeq, como temperatura máxima, mínima e média do ar, velocidade média do vento, umidade relativa média do ar e insolação, foram obtidos da base de dados do sistema NASA *Prediction of Worldwide Energy Resource* (NASA/POWER), obtidos no website <https://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/agro.cgi?na> (WHITE et al., 2008;

MOELETSI; WALKER, 2012). Segundo Monteiro (2015), os dados meteorológicos gerados pelo NASA/POWER são satisfatórios para a temperatura do ar, radiação solar e evapotranspiração de referência, esta última calculada a partir da equação de Penman-Monteith, padrão da FAO (ALLEN et al., 1998).

Para a determinação do melhor critério para se determinar o número de dias trabalháveis (NDT) para colheita mecanizada da cana-de-açúcar, foram consideradas 27 combinações para a estimação do NDT empregando-se: três níveis de precipitação (PREC); três níveis da relação entre o armazenamento de água no solo e a capacidade de água disponível (ARM/CAD); e três níveis de CAD (Tabela 3.1).

A variação das CADs visou simular três tipos diferentes de solo com textura arenosa (CAD = 40 mm), textura média (CAD = 80 mm) e textura argilosa (CAD = 120 mm). Esses valores de CAD consideram um perfil de solo de 1 m de profundidade. A definição dos limites de PREC e de ARM/CAD para que um dia seja considerado como trabalhável foi feita com base nos trabalhos de Ataíde et al. (2012), Monteiro et al. (2014) e Estrada et al. (2015).

Tabela 3.1 – Critérios de capacidade de água disponível (CAD), precipitação (PREC) e da relação entre armazenamento de água no solo e CAD (ARM/CAD) para determinação de dia trabalhável.

Valores de CAD (mm)	Valores de PREC (mm)	Valores de ARM/CAD (%)
40	3	70
80	5	80
120	7	90

Com base nos critérios apresentados na Tabela 3.1, foi estabelecida a combinação de três fatores em três níveis, totalizando 27 combinações, que foram testadas para a determinação do NDT. As combinações dos critérios objetivaram identificar a melhor delas para cada região do estado, assim como propor um critério geral (único) para determinação do NDT para todo o estado de São Paulo. A Tabela 3.2 apresenta todas as combinações de critérios testadas para a determinação do NDT no estado de São Paulo.

Para se definir o melhor critério para determinação do NDT foi feita uma análise comparativa entre os valores mensais observados nas usinas (NDT Obs) e os estimados a partir dos critérios da Tabela 3.1 (NDT Est). O desempenho das

estimativas de NDT foi avaliado por meio dos seguintes erros e índices de desempenho: erro médio (EM); erro absoluto médio (EAM); índice de concordância de Willmott (d), que indica a exatidão das estimativas; coeficientes de determinação (R^2) e de correlação de Pearson (r), que indicam a precisão das estimativas; e índice de confiança (C) de Camargo e Sentelhas (1997).

Essas análises estatísticas foram executadas no software R, enquanto que a elaboração de gráficos foi feita com o software *Statistica* 11.0. De posse dos resultados, foram classificados para cada região os três melhores modelos de acordo com o menor EAM. Havendo empate no EAM, passou-se a considerar o índice C, uma vez que este é o produto entre o índice d (exatidão) e o r (precisão).

As equações 3.1 a 3.8 apresentam as formas de determinação dos índices e erros listados anteriormente.

O coeficiente de correlação de Pearson, r, é uma medida adimensional que pode assumir valores entre -1 e 1 e serve para quantificar o grau de relacionamento linear entre duas variáveis quantitativas (X e Y). Valor de r próximo a 1 (-1) indica uma alta correlação linear positiva (negativa), ou seja, que as variáveis X e Y são diretamente (inversamente) proporcionais entre si. Valores próximos a zero indicam que não existe qualquer relação linear entre as variáveis. O coeficiente de correlação entre os valores de X e Y é dado por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (3.1)$$

em que: r é o coeficiente de correlação de Pearson; $x_1, x_2, \dots, x_n$ e $y_1, y_2, \dots, y_n$ são os valores de NDT observados e estimados, respectivamente, ao passo que as médias aritméticas dessas variáveis ($\bar{x}$ e $\bar{y}$) são calculadas por :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.2)$$

e

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.3)$$

O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida descritiva da qualidade do ajustamento obtido pelo modelo de regressão linear que indica a proporção da variação de Y que é "explicada" pela regressão ou quanto da variação na variável resposta Y está sendo explicada pela variável preditora X . O coeficiente de determinação pode assumir valores entre 0 e 1, sendo que valores próximos a 1 podem indicar que o modelo proposto é adequado para descrever o fenômeno (OLIVEIRA, 2016).

O erro médio (EM) mede a tendência de o modelo superestimar ou subestimar os dados estimados em relação aos observados. Esta tendência, também chamada de erro sistemático, é definida como (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011):

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad (3.4)$$

sendo: X_i o dado observado; Y_i o dado estimado

O erro médio não traz informação a respeito dos erros individuais e, portanto, não pode ser usado como medida de acurácia da simulação. Além disso, apesar de fornecer uma idéia da tendência ou erro sistemático, o erro médio é afetado pelo fato de que erros individuais positivos e negativos de mesma magnitude se cancelam na somatória, o que geralmente leva à subestimação do erro das simulações (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011). O erro absoluto médio (EAM) contorna este problema por ser menos afetado por pontos com valores anormalmente extremos, também chamados "pontos singulares" (ou "outliers" em Inglês), sendo considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (FOX, 1981).

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n (|X_i - Y_i|)}{n} \quad (3.5)$$

A raiz quadrada do erro médio (RQEM) é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de que a RQEM apresenta

valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. A RQEM é definida por:

$$RQEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (3.6)$$

O índice de concordância (d), proposto por Willmott et al (1985), é uma medida descritiva que reflete a precisão dos valores preditos (variável Y) em relação aos valores observados (variável X) que pode ser facilmente interpretado e aplicado em comparações de concordância para diferentes modelos/métodos, independentemente das unidades de medida das variáveis (OLIVEIRA, 2016). O índice d pode assumir valores entre 0 e 1, sendo que d = 1 indica uma perfeita concordância e d = 0 uma total discordância entre os valores observados e preditos. O índice de concordância (d) é calculado como:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{\sum (|X_i - \bar{X}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \right] \quad (3.7)$$

sendo: $\bar{X}$ a média dos valores observados.

De acordo com Camargo e Sentelhas (1997), ao estudar o acordo entre dois métodos ou modelos, a precisão é dada pelo coeficiente de correlação, r, e indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média; a exatidão é dada pelo índice d de Willmott e está relacionada ao afastamento dos valores preditos em relação aos observados e a confiança ou desempenho do método ou modelo é dada pelo índice c, que reúne os índices de precisão, r, e de exatidão, d, sendo expresso por:

$$c = d \cdot r \quad (3.8)$$

O critério de interpretação para o índice de desempenho c dos métodos/modelos estudados em relação ao modelo/método padrão é apresentado na Tabela 3.2:

Tabela 3.2. Critérios de interpretação do índice de desempenho “c”.

Índice de desempenho “c”	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 - 0,85	Muito bom
0,66 - 0,75	Bom
0,61 - 0,65	Mediano
0,51 - 0,60	Sofrível
0,41 - 0,50	Mal
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

Após a avaliação dos três melhores modelos por meio da análise estatística, utilizou-se a função de criação de Box Plot no software *Statística* em busca de um único modelo que pudesse ser aplicado em todo o estado de São Paulo, avaliando individualmente cada variável. Neste caso, os critérios (CAD, PREC ou ARM/CAD) foram avaliados utilizando todo o banco de dados, sem distinção por região, considerando-se o EAM de cada critério. Dessa forma, a CAD, a PREC e o ARM/CAD que possuiu o menor EAM quando se analisou todos os dados sem separação por região compuseram o modelo geral para determinação do número de dias trabalháveis.

Como o estudo visa a determinação de critérios agrometeorológicos para determinação do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, após a determinação dos critérios individuais para cada localidade, esses foram espacializados por meio da interpolação pelo método Voronoi (Florez et al., 2013), utilizando-se o software *Open Source QuantumGIS* (QGIS).

Salles (2010) recomenda a interpolação de Voronoi uma vez que além de permitir a delimitação exata de áreas de influência, o método favorece a otimização nas investigações de campo.

O método Voronoi é um tipo especial de decomposição de um dado espaço, determinado pela distância para uma determinada família de objetos (subconjuntos) no espaço. Estes objetos são normalmente chamados de sítios ou geradores. Cada sítio está associado a uma célula de Voronoi correspondente.

Tendo sido desenvolvidos os critérios individuais e geral foi então feita a avaliação ou validação desses por meio da comparação das estimativas de NDT com os dados observados de NDT independentes, que não fizeram parte da

determinação dos critérios. Tal avaliação empregou os mesmos erros e índices estatísticos apresentados nas equações 3.1 a 3.8. Para tanto, foram escolhidos 15 municípios (usinas) para os quais foram obtidos dados observados de horas de interrupção de moagem de cana para o ano de 2015, assim como os dados meteorológicos correspondentes.

Os dados utilizados na validação dos critérios foram resultado da análise de desempenho dos modelos com base em dados mensais, tal como foi feito para a estimação dos modelos individuais e geral. Tal metodologia foi aplicada ao invés de uma análise com base em dados anuais (soma dos mensais) porque se entendeu que quanto maior a quantidade de dados analisados maior o subsídio para o resultado obtido.

3.3. Resultados e Discussão

Após as simulações com as 27 combinações de critérios de PREC, CAD e ARM/CAD para cada uma das 23 localidades e 30 usinas analisadas, definiu-se as três melhores para a estimação do NDT. A Tabela 3.4 apresenta a relação dessas três melhores combinações de critérios para cada uma das localidades, para as quais também são apresentados o EAM e o índice C. Para os casos em que havia mais de um dado observado por município os resultados escolhidos foram aqueles que apresentaram o menor EAM na média do mês ou, em caso de empate, o melhor desempenho (C). Vale observar que na coluna que estão os critérios (3ª coluna da esquerda para direita), o primeiro número refere-se à CAD, o segundo ao limite de precipitação para o dia ser considerado como trabalhável e o último o limite da relação ARM/CAD.

Avaliando-se a Tabela 3.3, observa-se que na grande maioria dos locais prevalece o valor de CAD = 40 mm e mesmo quando o valor de CAD de 80 mm se mostrou mais adequada, o segundo melhor foi a CAD de 40 mm com valores de EAM e C muito próximos, como observado para Araraquara, Piracicaba e Potirendaba, onde os EAMs do primeiro e do segundo melhores critérios foram iguais e o desempate ocorreu com base no índice C. Esses resultados evidenciam que para estudos de dias trabalháveis deve-se empregar CADs menores, já que a camada de solo sob influência das máquinas se restringe normalmente a 30 cm de

profundidade, como evidenciado nos estudos de Ahaneku e Onwualu (2007) e Ataíde et al. (2012).

Tabela 3.3 – Classificação das três melhores combinações de critérios para a determinação do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar e seus respectivos erro absoluto médio (EAM) e índice de desempenho (C) para cada localidade

Município	Classificação	Crítérios	EAM (dias)	C
Andradina	1º	40-03-80	2,320	0,881
Andradina	2º	40-05-80	2,400	0,876
Andradina	3º	40-03-70	2,520	0,867
Araçatuba	1º	40-03-70	2,440	0,865
Araçatuba	2º	40-03-80	2,520	0,869
Araçatuba	3º	40-05-70	2,720	0,851
Araraquara	1º	80-03-90	3,720	0,692
Araraquara	2º	40-03-80	3,720	0,691
Araraquara	3º	40-05-80	3,760	0,689
Assis	1º	40-03-70	3,654	0,794
Assis	2º	80-03-80	3,769	0,769
Assis	3º	40-05-70	3,846	0,771
Capivari	1º	40-03-80	2,087	0,895
Capivari	2º	80-03-90	2,522	0,868
Capivari	3º	40-03-70	2,565	0,871
Cardoso	1º	40-07-90	1,267	0,967
Cardoso	2º	40-03-90	1,333	0,951
Cardoso	3º	40-05-90	1,433	0,948
Clementina	1º	40-05-90	1,224	0,956
Clementina	2º	40-07-90	1,265	0,955
Clementina	3º	40-03-90	1,449	0,953
Dois Córregos	1º	40-03-80	3,640	0,723
Dois Córregos	2º	40-03-70	3,680	0,707
Dois Córregos	3º	40-03-90	3,720	0,711
Fernandópolis	1º	40-05-90	1,333	0,958
Fernandópolis	2º	40-03-90	1,400	0,950
Fernandópolis	3º	40-07-90	1,533	0,948
Guariba	1º	40-03-80	3,240	0,671
Guariba	2º	40-05-80	3,360	0,655
Guariba	3º	40-03-70	3,440	0,674
Ipaussu	1º	40-03-70	3,370	0,806
Ipaussu	2º	40-05-70	3,556	0,787
Ipaussu	3º	40-07-70	3,556	0,787
Ituverava	1º	40-03-70	3,520	0,739
Ituverava	2º	40-05-70	3,600	0,735
Ituverava	3º	40-07-70	3,600	0,735

“Continua”

“Continuação”

Município	Classifacão	Modelo	EAM (dias)	C
Jaú	1º	40-03-80	1,840	0,939
Jaú	2º	80-03-90	1,960	0,915
Jaú	3º	40-05-80	2,160	0,925
Mirandópolis	1º	40-03-70	1,958	0,920
Mirandópolis	2º	80-03-80	2,125	0,915
Mirandópolis	3º	40-03-80	2,208	0,913
Orindiúva	1º	40-07-90	5,033	0,716
Orindiúva	2º	120-07-90	5,100	0,697
Orindiúva	3º	40-05-90	5,533	0,680
Paraguaçu Paulista	1º	40-03-80	1,654	0,943
Paraguaçu Paulista	2º	80-03-90	1,769	0,940
Paraguaçu Paulista	3º	40-07-80	1,808	0,937
Penápolis	1º	40-05-90	1,706	0,787
Penápolis	2º	40-07-90	1,765	0,798
Penápolis	3º	40-03-90	2,000	0,777
Piracicaba	1º	80-03-90	2,043	0,860
Piracicaba	2º	40-03-90	2,043	0,853
Piracicaba	3º	40-03-80	2,130	0,843
Potirendaba	1º	80-03-90	1,944	0,725
Potirendaba	2º	40-03-90	2,167	0,744
Potirendaba	3º	40-03-80	2,222	0,697
Pradópolis	1º	40-03-90	0,962	0,958
Pradópolis	2º	40-05-90	1,077	0,955
Pradópolis	3º	40-07-90	1,192	0,944
Queiróz	1º	40-07-90	1,750	0,919
Queiróz	2º	40-05-90	2,000	0,903
Queiróz	3º	40-03-90	2,396	0,892
São Carlos	1º	40-03-80	3,080	0,798
São Carlos	2º	80-03-90	3,160	0,802
São Carlos	3º	40-03-90	3,240	0,789
Valparaíso	1º	40-03-90	1,240	0,952
Valparaíso	2º	40-05-90	1,480	0,941
Valparaíso	3º	40-07-90	1,640	0,933

Esse fato também pode ser notado, ao se observar que a CAD de 120 mm foi classificada como critério para a determinação do NDT apenas no segundo lugar na localidade de Orindiúva, mostrando claramente que CADs elevadas devem ser evitadas como critério agrometeorológico para a determinação do NDT.

Com relação aos EAMs, observa-se na Tabela 3.4 que na grande maioria das localidades, os valores ficaram entre 0,9 e 3,6 dias, o que representa erros moderados. Apenas em Orindiúva os EAMs foram maiores, acima de 5,0 dias. As

causas para isso podem ser: erros nos apontamentos de paradas por chuva; inconsistências nas bases de dados meteorológicos; ou tipo de solo que não se enquadra na faixa de CADs estudadas.

Nos casos em que prevaleceu a CAD de 80 mm como critério, o que ocorreu em Araraquara, Piracicaba e Potirendaba (Tabela 3.4), nota-se que as diferenças de EAM entre o melhor critério e o segundo melhor foi muito pequena, o que mostra que tanto a CAD de 40 como de 80 mm possibilitarão uma boa estimativa do NDT. Os resultados que mostram predomínio de CAD 80 mm para Piracicaba mostram que o valor de CAD = 100 mm adotado por Monteiro et al. (2014) foi adequado para a determinação do NDT tanto para operação que considera apenas o tráfego de máquinas, como a colheita, como operações de revolvimento do solo, em que a CAD considerada deve ser um pouco maior, especialmente nas localidades em que predominam solos de textura média a argilosa, como na região de Piracicaba.

A Tabela 3.5 apresenta apenas o melhor modelo para cada município e a coordenada geográfica da estação meteorológica na qual foram obtidos os dados de precipitação e, conseqüentemente, os demais dados necessários para a confecção do BHSeq. Nota-se que há uma grande variação nas combinações de critérios, o que para estudos específicos não geraria problemas, porém para estudos mais gerais dificultaria as análises.

De forma a facilitar a interpretação dos resultados, a Tabela 3.6 apresenta a frequência de ocorrências de cada critério, relativos à CAD, PREC e ARM/CAD para o conjunto de localidades analisadas. Com base nos resultados da Tabela 3.6 é possível identificar uma maior frequência (87%) da CAD de 40 mm como critério para determinação do NDT. Para a PREC, o valor de 3 mm é mais recorrente, com uma frequência de 74% dos locais, enquanto que ARM/CAD de 90% é o que predomina em 48% dos locais, seguido do ARM/CAD de 80% que ocorreu em 30% dos locais. Para se entender melhor o impacto de cada um desses critérios para determinação do NDT, foi avaliado o EAM de cada um deles para todas as localidades, como mostram as Figuras 3.3, 3.4 e 3.5.

Tabela 3.5 – Melhor combinação de critérios para a determinação do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar para as diferentes localidades avaliadas no estado de São Paulo

ID	Município	Latitude	Longitude	Altitude (m)	CRITÉRIO
1	Andradina	20°55'00"	51°22'00"	370	40-03-80
2	Araçatuba	21°03'40"	50°27'58"	320	40-03-70
3	Araraquara	21°40'00"	48°14'00"	680	80-03-90
4	Assis	22°38'21"	50°24'05"	579	40-03-70
5	Capivari	23°00'13"	47°30'32"	508	40-03-80
6	Cardoso	20°08'00"	49°58'00"	420	40-07-90
7	Clementina	21°34'00"	50°27'00"	570	40-05-90
8	Dois Córregos	22°22'00"	48°23'00"	719	40-03-80
9	Fernandópolis	20°18'00"	50°15'00"	520	40-05-90
10	Guariba	21°21'09"	48°12'31"	570	40-03-80
11	Ipaussu	23°01'45"	49°34'05"	624	40-03-70
12	Ituverava	20°20'00"	47°46'00"	578	40-03-70
13	Jaú	22°13'29"	48°35'56"	459	40-03-80
14	Mirandópolis	20°56'00"	51°07'00"	420	40-03-70
15	Orindiúva	20°10'50"	49°22'03"	500	40-07-90
16	Paraguaçu Paulista	22°25'15"	50°34'16"	491	40-03-80
17	Penápolis	21°26'00"	50°04'00"	430	40-05-90
18	Piracicaba	22°47'00"	47°58'00"	591	80-03-90
19	Potirendaba	21°02'37"	49°22'29"	489	80-03-90
20	Pradópolis	21°21'48"	48°03'51"	540	40-03-90
21	Queiróz	21°48'00"	50°14'00"	430	40-07-90
22	São Carlos	21°44'53"	47°46'06"	620	40-03-80
23	Valparaíso	21°15'00"	50°52'00"	400	40-03-90

Tabela 3.6 – Frequência de ocorrência dos melhores critérios, relativos à capacidade de água disponível do solo (CAD), da chuva (PREC) e do armazenamento relativo (ARM/CAD), para determinação do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo

Critérios		Número de ocorrências	Frequência relativa (%)
CAD	40 mm	20	87
	80 mm	3	13
	120 mm	0	0
PREC	3 mm	17	74
	5 mm	3	13
	7 mm	3	13
ARM/CAD	70%	5	22
	80%	7	30
	90%	11	48

Figura 3.3 – Erro absoluto médio (EAM) do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, considerando-se o critério da capacidade de água disponível do solo (CAD)

Conforme se pode observar nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5, os critérios que resultaram nos menores EAMs foram a CAD de 40 mm, a PREC de 3 mm e o ARM/CAD de 90%, o que corrobora os resultados apresentados na Tabela 3.6. Dessa forma, sugere-se que para estudos mais abrangentes, englobando regiões ou estados, se determine o número de dias trabalháveis por meio da combinação de critérios CAD = 40 mm, PREC = 3 mm e ARM/CAD = 90% (40-03-90). Este resultado se assemelha ao empregado por Ataíde et al. (2012) que utilizaram o limiar de PREC de 5 mm e o ARM/CAD de 90%. Limiares semelhantes para PREC e ARM/CAD também foram empregados por Monteiro et al. (2014) para definir a interrupção das operações com implementos agrícolas para o revolvimento do solo. Neste caso, os autores consideraram que com PREC > 5 mm e com ARM/CAD >

90% não haviam condições favoráveis para o manejo dos solos, assim como admitido por Ataíde et al. (2012).

No caso do critério ARM/CAD, fica evidente que o melhor deles é o de 90%, já que esse limiar está isento de *outliers* e valores extremos, o que permite ter maior confiabilidade na utilização deste critério para a determinação dos dias trabalháveis com base na combinação de critérios generalizados para todo o estado.

A distribuição espacial dos critérios específicos para cada região produtora de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, por meio da interpolação pelo método Voronoi, é apresentada na Figura 3.6.

Figura 3.4 – Erro absoluto médio (EAM) do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, considerando-se o critério do limiar de chuva (PREC)

Figura 3.5 – Erro absoluto médio (EAM) do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, considerando-se o critério do limiar do armazenamento relativo de água no solo (ARM/CAD)

De acordo com o mapa da Figura 3.6 nota-se que não houve um predomínio de determinada combinação de critérios no estado, porém, foi possível se delimitar a área de abrangência para cada uma dessas combinações. A variação observada é decorrente das diferenças nas características texturais e físico-hídricas dos solos de cada região, do relevo, assim como das condições de evapotranspiração, já que nas áreas mais quentes, a tendência é que o solo comece a secar antes, favorecendo a retomada do tráfego de máquinas mais cedo (THOMASSON; JONES, 1991).

Figura 3.6 – Espacialização dos critérios para determinação do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, com base no método Voronoi.

Outro aspecto importante de se ressaltar é que muitas das áreas do estado careceram de informações, o que levou o método Voronoi a definir os critérios para área, sem que na realidade houvesse informações para tanto. Um exemplo disso é a faixa que se estende desde Andradina, passando pelo Pontal do Paranapanema, até a região de Paraguaçu Paulista. Por outro lado, ao sul do estado, duas regiões analisadas (Assis e Ipaussu) apresentaram o mesmo critério para determinação do NDT, o que leva a acreditar que haja realmente uma continuidade desses critérios. Em outras regiões do estado, também é possível identificar municípios vizinhos com o mesmo critério como são os casos de Cardoso e Orindiúva, Araraquara e São Carlos, Jau e Dois Córregos e Araçatuba e Mirandópolis (Figura 3.6).

Com base no que foi apresentado anteriormente, fica evidente que a determinação do NDT para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo pode ser estabelecida por meio de dois procedimentos, usando critérios específicos para a determinação do NDT para cada região (Figura 3.6) ou usando

critérios médios para todo o Estado, ou seja, a combinação CAD = 40 mm, PREC = 3 e ARM/CAD = 90% (40-03-90).

Toro e Hansson (2004) desenvolveram um modelo de simulação para operações de máquinas de campo usando uma técnica de simulação de eventos discretos a fim de analisar o desempenho das máquinas com base no status diário de trabalhabilidade do solo para uma série de anos, bem como comparar os resultados com os de um método mais simples com base em valores médios de probabilidade de dias de trabalho disponíveis para as operações e as estações do ano. Os autores concluíram que o método de valores médios de probabilidade de dias de trabalho, por ser simples, gerou resultados considerados insatisfatórios quando comparados ao procedimento de determinação diária das condições de trabalhabilidade. No presente estudo, o procedimento proposto pode ser considerado como de média complexidade em relação aos dois modelos estudados por Toro e Hansson (2004).

Uma maneira de se garantir a viabilidade do uso dos critérios propostos (específico e geral) é por meio da validação desses, confrontando-se as estimativas de NDT com os dados observados nas usinas. A Tabela 3.8 apresenta a análise estatística referente à validação dos dois critérios propostos (geral e específico), em que foram usados valores de NDT calculados e observados em 15 localidades do estado para o de ano 2015. Observa-se na Tabela 3.8 que a magnitude dos erros pelos dois procedimentos é bem semelhante, assim como o desempenho em termos de precisão e exatidão. Apesar disso, como era de se esperar, os critérios específicos geram um EAM ligeiramente menor (3,8 dias) do que os critérios gerais (4,4 dias). De um modo geral, os critérios específicos e gerais conseguiram explicar entre 78 e 79% da variação do NDT entre as diferentes regiões do estado, o que mostra o desempenho satisfatório desses critérios, o que também pode ser comprovado com os valores do índice d e C, sendo este último classificado como “Bom” para os dois procedimentos.

Tabela 3.8 – Erro médio (EM), erro absoluto médio (EAM), índice de concordância (d), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), índice de confiabilidade (C), raiz quadrada do erro médio (RQEM, dias) das estimativas do número de dias trabalháveis para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, considerando-se os critérios específicos regionais e os critérios gerais (40-03-90).

Variáveis, erros e índices	Critérios específicos	Critérios Gerais (40-03-90)
NDT médio mensal obs.	19,3±8,6	19,3±8,6
NDT médio mensal est.	19,0±7,8	21,4±6,5
n	133	133
EM (dias)	-0,4	2,0
EAM (dias)	3,8	4,4
d	0,88	0,84
R^2	0,63	0,61
R	0,79	0,78
C	0,70	0,66
RQEM (dias)	5,3	5,7

Avaliando-se a Tabela 3.8 é possível obter informações importantes. Em primeiro lugar, analisando o EM conclui-se que o modelo individual (específico para cada região) tem uma leve tendência a subestimar o NDT (EM = -0,4 dias) enquanto que o modelo geral (40-03-90) o superestima (EM = 2,0 dias). Em relação ao EAM, observa-se que tanto o modelo individual quanto o modelo geral possuem valores muito próximos, ou seja, enquanto o modelo individual erra, em média, 3,8 dias, o modelo geral erra 4,4 dias. Essa diferença é pequena e não seria um bom argumento para não se utilizar o modelo geral em análises de NDT para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Os demais índices estatísticos também foram bem semelhantes, o que permite considerar que tanto o uso dos critérios específicos como gerais possibilitará uma boa estimativa do NDT para as diferentes regiões do estado de São Paulo, assim como de outras regiões sob condições climáticas similares.

3.4. Conclusões

Os resultados deste estudo permitem concluir que:

- Para se determinar o NDT deve-se trabalhar com valores menores de CAD, recomendando-se 40 mm;
- Pode-se determinar o NDT empregando critérios individualizados por região ou critérios gerais para todo o estado de São Paulo;
- Os critérios específicos variaram entre as regiões, havendo, no entanto, um predomínio da condição de CAD = 40 mm. No caso dos critérios gerais, a melhor combinação foi a que empregou para a determinação do NDT a CAD de 40 mm e os limiares de PREC e de ARM/CAD de 3 mm e 90%, respectivamente;
- A estimação do NDT com base em critérios agrometeorológicos se mostrou uma ferramenta útil e de média complexidade, gerando resultado com bom grau de confiabilidade, o que foi expresso pelo índice C.

Referências

- AHANEKU, I. E.; ONWUALU, A. P. Predicting suitable field workdays for soil tillage in north central Nigeria. **Nigerian Journal of Technology**, v. 26 n.1, March 2007.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, D.M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 297 p. (**FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56**).
- ATAÍDE, L. T.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; SILVA D. A. B.; SOUZA, J. R. P. The probability of potentially useful work days during the year in Londrina. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 6, p. 2215-2226, nov./dez. 2012.
- BRISSON, N.; SEGUIN, B.; BERTUZZI, P. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. **Agricultural and Forest Meteorology**, n.59, p. 267-287, 1992.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CARVALHO, A. L.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; PORFIRIO, A. C. S.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; SANTOS, M. A.; WANDERLEY, H. S. Probabilidade de ocorrência de períodos secos para a região de Rio Largo, Alagoas. **XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Belo Horizonte, MG, 2009.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2001. 155p.

COOPER, G.; MCGECHAN, M. B.; VINTEN, A. J. A. The Influence of a Changed Climate on Soil Workability and Available Workdays in Scotland. **Journal of Agricultural Engineering Research**. n. 68, p. 253-269, 1997.

DAEE. Portal do Departamento de Águas e Energia – **Banco de dados hidrológicos**. Disponível em: < <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>>. Acesso em 28/11/2016.

ESTRADA, J. S.; SCHLOSSER, J. F.; FARIAS, M. S.; SANTOS, G. O.; RÜDELL, I, Y. P. Metodologia para estimar o número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 62, n.4, p. 410-414, jul-ago, 2015.

FLOREZ, A. J.; DELGADO, J. E.; MERA, M. Aplicación de la suavización Spline en la modelación de la temperatura promedio mensual del Valle del Cauca usando ponderación por diagramas de Voronoi. **Entre Ciencia e Ingeniería**, ISSN 1909-8367, Año 7. No. 14, página 32 – 37, Segundo Semestre de 2013.

FOX, D. G. Judging Air Quality Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 62, p. 599-609, 1981.

GARCIA, B. I. L.; SENTELHAS, P. C.; TAPIA, L.; SPAROVEK, G. Filling in missing rainfall data in the Andes Region of Venezuela, based on a cluster analysis approach. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v. 14, n.2, p. 225-233, 2006.

GUARDO, A. D.; FINIZIO, A. A client–server software for the identification of groundwater vulnerability to pesticides at regional level. **Science of the Total Environment**. n. 530–531, p. 247–256, 2015.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo arps: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, 591 - 608, 2011.

LHOMME, J. P.; KATERJI, N. A simple modelling of crop water balance for agrometeorological applications. **Ecological Modelling**, v.57, n.199I, p.11-25. 1991.

MOELETSI, M. E.; WALKER, S. Evaluation of NASA satellite and modelled temperature data for simulating maize water requirement satisfaction index in the Free State Province of South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**, n.50–52, p.157-164, 2012.

MONTEIRO, L. A. **Sugarcane yield gap in Brazil: a crop modelling approach**. 2015. 132p. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2015.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PIEDADE, S. M. S. Dias trabalháveis para o manejo do solo em função da chuva e da disponibilidade hídrica do solo em diferentes regiões brasileiras. **Revista Ambiente e Água**. vol. 9 n. 3, 2014.

NASA POWER. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) - **Climatology Resource for Agroclimatology**. Disponível em: <
<https://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/cgiwrap/solar/agro.cgi?email=agroclim@larc.nasa.gov>>. Acesso em: 13/11/2016.

NUNES, L. N., KLUCK, M. M., FACHEL, J. M. G. Uso de imputação múltipla de dados faltantes: uma simulação utilizando dados epidemiológicos Periódico: **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, 2009.

OLIVEIRA, E. A. **Métodos para análise de concordância: estudo de simulação e aplicação a dados de evapotranspiração**. 2016. 178p. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2016.

SALLES, M. M. O uso do SIG na análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio São João – MG. **XII Curso de Especialização em Geoprocessamento**, 29 p., 2010.

SALVADOR, M. A.; SANTOS, L. S. F. C. Análise da precipitação na cidade de São Paulo no período 1961-2009. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 7. n. 6, p.7 – 20, 2010.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (**Publications in Climatology**, vol. VIII, n.1)

THOMASSON, A. J.; JONES, R. J. A. An Empirical Approach to Crop Modelling and the Assessment of Land Productivity. **Agricultural Systems**, n.37, p.351-367, 1991.

THOMASSON, A. J. Soil and climatic aspects of workability and trafficability. **Proceedings of the 9th Conference of the International Soil Tillage Research Organisation**, Osijek, Yugoslavia, p. 51-7. 1982.

THOMASSON, A. J. JONES, R. J. A. Computer mapping of soil trafficability in the UK. In **Agriculture: Computerization of Land Use Data**, ed. R. J. A. Jones & B. Biagi, p. 97-109, 1988.

THOMASSON, A. J. JONES, R. J. A. Land evaluation at regional scale. In **Land Qualities in Space and Time.**, Proceedings of a symposium by the International Society of Soil Science, ed. J. Bouma & A. K. Bregt. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, p. 231-40, 1989.

TORO, A.; HANSSON, P. A. Analysis of field machinery performance based on daily soil workability status using discrete event simulation or on average workday probability. **Agricultural Systems**. v. 79, p.109–129, 2004.

WHITE, J. W.; HOOGENBOOM, H.; STACKHOUSE JR., P. W.; HOELL, J. M. Evaluation of NASA satellite- and assimilation model-derived long-term daily temperature data over the continental US. **Agricultural and Forest Meteorology**. n.148, p. 1574–1584, 2008.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.

ZANDONADI, L.; PASCOALINO, A. Distribuição temporo-espacial das chuvas nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ). **Revista Geonorte**, Edição Especial, v.2, n.4, p.830 – 843, 2012.

4. NÚMERO DE DIAS TRABALHÁVEIS PARA A COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

Resumo

A determinação do número de dias trabalháveis (NDT) é uma ferramenta útil para o planejamento e as tomadas de decisão a respeito de diversas operações agrícolas. Dentre essas operações, a colheita é uma das mais importantes para o setor sucroenergético, já que o NDT irá definir o período efetivo da safra, o que irá auxiliar no dimensionamento da frota de colhedoras. Com base nisso, o presente estudo teve por objetivo determinar o NDT médio para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, por meio da utilização de critérios agrometeorológicos específicos para cada região e gerais para todo o estado. Para tanto, foram utilizados dados meteorológicos de 60 localidades situadas em todas as regiões produtoras de cana-de-açúcar do estado, para um período de 32 anos (1983 a 2014). Esses dados foram empregados no cálculo dos balanços hídricos sequenciais (BHSeq) diários de cada localidade, considerando-se as capacidades de água disponível (CAD) de 40 e 80 mm. Esses balanços hídricos permitiram a determinação do armazenamento relativo (ARM/CAD), posteriormente empregado na determinação do NDT, com base nos critérios específicos por região e gerais, juntamente com a chuva (PREC) e a CAD. Os critérios específicos foram determinados para cada região com base em dados de 30 usinas espalhadas no estado de São Paulo e com suas áreas de abrangência definidas pela espacialização feita pelo método Voronoi. Os critérios gerais foram aqueles que apresentaram os menores erros, sendo considerados os seguintes limiares: CAD = 40 mm; PREC = 3 mm; ARM/CAD = 90% (40-3-90). Após a determinação do NDT para cada uma das 60 localidades, foram gerados modelos de regressão linear múltipla para estimação do NDT em função da latitude, da longitude e da altitude, esta última obtida por meio das imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Esses modelos lineares apresentaram desempenhos variáveis na espacialização do NDT anual. Quando o NDT anual foi gerado por meio dos critérios específicos, o modelo linear gerou um erro padrão das estimativas de 20,5 dias, enquanto que o modelo que empregou o NDT anual calculado com os critérios gerais teve um erro padrão das estimativas de 3,8 dias. Os modelos lineares de estimação do NDT foram validados com dados independentes de 16 locais. Com base na validação dos mapas de NDT gerados pelos modelos lineares, foi possível observar que aquele feito a partir do critério geral (40-3-90) representou melhor a variação espacial do valor médio do NDT para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, com EAM da ordem de 3 dias no ano, ao passo que o mapa do NDT médio elaborado com base no modelo que usou os critérios específicos gerou um EAM = 18 dias. De acordo com o mapa gerado a partir dos critérios gerais (40-3-90), observa-se que NDT médio para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo varia de menos de 255 dias

nas regiões serranas de São Carlos e Botucatu, assim como na região de Ourinhos, a mais de 285 dias em praticamente toda a região oeste do estado. Conclui-se, portanto, que o uso dos critérios gerais de CAD, PREC e ARM/CAD (40-3-90) foi o mais adequado para se determinar o NDT para colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo e que o NDT varia regionalmente de acordo com as características climáticas de cada região.

Palavras-chave: Modelo agrometeorológico; Modelo linear multivariado; Chuva; Capacidade de água disponível; Armazenamento de água no solo; Variabilidade espacial

Abstract

The determination of the number of workable days (NWD) is a useful tool for planning and making decisions in several agricultural operations. Among these operations, the harvest is one of the most important for the sugar-energy sector, since the NWD will define the effective harvest period, which will help in the dimensioning of the harvest machines fleet. Based on this, the present study aimed to determine the average NWD for sugarcane mechanized harvest in the state of São Paulo, using agrometeorological criteria, specific to each region and general one for the entire state. For this purpose, meteorological data from 60 locations spread in all sugarcane producing regions of the state were used for a period of 32 years (1983 to 2014). These data were used for calculating the daily serial water balance (BHSeq) of each locality, considering the soil water holding capacities (DWC) of 40 and 80 mm. These water balances allowed the determination of the relative soil water storage (ARM/SWHC), later used in the determination of NWD, based on the specific by region and general criteria, together with rainfall (PREC) and SWHC. The specific criteria were determined for each region based on data from 30 mills in the state of São Paulo and their areas of coverage defined by Voronoi method. The general criteria were those that presented the smallest errors, considering the following thresholds: SWHC = 40 mm; PREC = 3 mm; ARM/SWHC = 90% (40-3-90). After the determination of NWD for each of the 60 locations, multiple linear regression models were generated for estimating NWD as function of latitude, longitude and altitude, the latter obtained through Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) images. These linear models presented variable performances in the spatialization of the annual NWD. When the annual NWD was generated using the specific criteria, the linear model generated a standard estimate error of 20.5 days, while the model that used the annual NWD calculated with the general criteria had a standard estimate error of 3,8 days. The NWD linear estimation models were validated with independent data from 16 new locations. Based on the validation of NWD maps generated by the linear models, it was possible to observe that the

one made based on the general criteria (40-3-90) represented better the spatial variation of NWD mean value for sugarcane mechanized harvest in the state of São Paulo, with mean absolute error (MAE) of about 3 days per year, whereas the average MAE for the NWD map elaborated using the model based on the specific criteria generated a MAE = 18 days. According to the map generated from the general criteria (40-3-90), it can be observed that the average NWD for sugarcane mechanized harvest in the state of São Paulo varies from less than 255 days in the mountainous regions of São Carlos and Botucatu, as well as in the region of Ourinhos, to more than 285 days in almost the entire western region of the state. It was concluded, therefore, that the use of the general criteria of SWHC, PREC and ARM/SWHC (40-3-90) was the most accurate to determine the NWD for sugarcane harvest in the state of São Paulo and also that the NWD varies regionally according to the climate characteristics of each region.

Keywords: Agrometeorological model; Multivariate linear model; Rain; available water capacity; Storage of water in the soil; Spatial variability

4.1. Introdução

Segundo Castro Neto (2001), um dos fatores mais críticos na determinação do número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas se refere ao levantamento das condições do solo para a tomada de decisão sobre o tráfego de máquinas em uma determinada área, sem que haja alterações de suas propriedades físicas, como a porosidade e retenção de água.

Severiano (2007), avaliando indicadores de qualidade estrutural na compactação do solo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, chamou a atenção para o fato de que a identificação dos impactos da colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar na estrutura do solo, em diferentes classes, pode se tornar uma importante estratégia de manejo para a minimização dos efeitos da compactação. Nesse contexto, o autor avaliou o efeito das operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes momentos da safra sobre a compactação do solo e as alterações estruturais, como a pressão de pré-consolidação e o intervalo hídrico ótimo (IHO).

Ainda segundo Severiano (2007), a colheita mecanizada da cana-de-açúcar realizada na zona de friabilidade causou compactação do solo, enquanto que a colheita da cana-de-açúcar realizada manualmente não promoveu o mesmo efeito. A

densidade do solo na pressão de pré-consolidação foi um bom indicativo para diagnosticar a ocorrência de alterações estruturais. Em relação ao IHO, o autor comenta que a macroporosidade do solo limitante apresentou restrições ao crescimento das plantas em níveis de compactação inferiores à densidade do solo crítica do IHO. Dessa forma fica evidenciada a necessidade de se tomar cuidados com o conteúdo de água no solo para a operação de colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

Carvalho et al. (2009) afirmam que simples análises empíricas de períodos secos em séries de precipitação de longo prazo já fornecem informações úteis para diversas aplicações agrícolas. A duração dos períodos secos é importante na definição ou no desenvolvimento de manejos agrícolas como, por exemplo, planejamento de colheita, aplicação de defensivos e controle de plantas daninhas.

Fernandes et al. (2000) determinaram o número de dias potencialmente úteis para o trabalho com máquinas florestais em função do balanço de água no solo para a região de Guanhães, MG, e chegaram a 170 dias potencialmente úteis para as operações, sendo que os meses de janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro foram os que apresentaram a menor quantidade de dias úteis.

Ataíde et al. (2012), estimando as probabilidades de dias úteis de trabalho em campo e a trafegabilidade de maquinários, para o município de Londrina, PR, estabeleceram os dias favoráveis ao trabalho com máquinas no campo como sendo aqueles em que os valores de armazenamento de água no solo eram iguais ou inferiores a 90% da capacidade de água disponível na camada superficial de 30 cm do solo e a precipitação menor que 5 mm e concluíram que o melhor período para realização de trabalhos com máquinas se estende de abril a setembro, com o período ótimo ocorrendo entre final de julho e início de setembro.

Monteiro et al. (2014) avaliando os dias trabalháveis para o manejo do solo em função da chuva e da disponibilidade hídrica do solo nos municípios de Piracicaba, SP, Passo Fundo, RS, Londrina, PR, e Dourados, MS concluíram que dentre as localidades analisadas houve predomínio do número médio de dias trabalháveis entre 11 e 20 dias na grande maioria dos meses, exceto para Londrina onde houve maior predominância de baixo número de dias trabalháveis, até 10 dias, ao longo do ano.

Estrada et al. (2015), estudando as probabilidades de dias trabalháveis para a cultura do arroz em Santa Maria, RS, por meio da cadeia de Markov concluíram

que o período favorável para as operações com máquinas agrícolas é compreendido entre o segundo decêndio de novembro e o primeiro decêndio de abril. Os autores consideraram que o dia foi trabalhável sempre que a precipitação do dia foi menor que 5 mm e o armazenamento de água no solo (ARM) esteve em 40 e 90% da capacidade de água disponível (CAD).

Monteiro et al. (2011), objetivando determinar as probabilidades de sequências de dias trabalháveis (com chuva < 5 mm e armazenamento de água no solo entre 40 e 90% da capacidade de água disponível) por meio da cadeia de Markov, durante o período de 1979 a 2008, visando ao planejamento das operações com máquinas agrícolas em diferentes períodos do ano na região de Piracicaba, SP concluiu que o mês de julho apresentou as maiores probabilidades de ocorrência e o mês de janeiro foi o que apresentou as menores probabilidades.

Dada a grande importância do conhecimento do NDT para o planejamento das operações com máquinas agrícolas, este estudo teve por objetivo determinar a variação espacial do NDT para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, considerando-se critérios relativos à capacidade de água disponível (CAD), à chuva (PREC) e ao armazenamento relativo de água no solo (ARM/CAD) de forma regionalizada e geral, de modo a subsidiar o planejamento da referida cultura.

4.2. Material e Métodos

A determinação do número de dias trabalháveis (NDT) para o estado de São Paulo foi feita de duas formas distintas, considerando-se os critérios de capacidade de água disponível (CAD), precipitação (PREC), e armazenamento relativo de água no solo (ARM/CAD), de acordo com cada região (Figura 4.1) e considerando-se os critérios gerais de CAD, PREC e ARM/CAD, em função dos valores predominantes em todo o estado de São Paulo, ou seja, CAD de 40 mm, PREC de 3 mm e ARM/CAD de 90% (40-03-90). Nesses dois contextos, um dia foi considerado como trabalhável sempre que para uma determinada CAD, houve PREC e ARM/CAD menores que os valores de referência.

Para se determinar o NDT pelos dois procedimentos para todo o estado de São Paulo, a primeira etapa foi o levantamento de dados meteorológicos para 50 localidades apresentadas na Figura 4.1 e na Tabela 4.1, para as quais foram obtidos

dados diários de 32 anos (1982 a 2013), cobrindo todas as regiões produtoras de cana-de-açúcar do estado de São Paulo.

Os dados meteorológicos foram obtidos junto às bases do DAEE/SP (chuva diárias) e da base do sistema NASA/POWER (temperaturas máxima e mínima, umidade relativa média, radiação solar e velocidade do vento). Os dados provenientes do NASA/POWER foram empregados na estimação da evapotranspiração de referência (ET_o), de acordo com o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Os dados de ET_o e de chuva foram utilizados na elaboração dos balanços hídricos sequenciais (BHSeq) diários, de acordo com o método de Thornthwaite e Mather (1955) para cada uma das localidades, considerando-se as CADs de 40 e 80 mm. Esses balanços hídricos foram utilizados para definir o ARM/CAD para cada dia do ano.

Figura 4.1 – Localidades empregadas na elaboração dos modelos de regressão linear múltipla e para validação desses modelos.

Tabela 4.1 – Locais empregados na determinação do número de dias trabalháveis (NDT) para a colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo

ID	Município	Latitude	Longitude	Alt
1	Araraquara	21°40'00"	48°14'00"	680
2	Jaú	22°28'12"	48°31'48"	459
3	Araçatuba	21°13'44"	50°46'32"	320
4	Guariba	21°21'09"	48°12'31"	570
5	Capivari	23°00'13"	47°30'32"	508
6	Clementina	21°34'00"	50°27'00"	570
7	Piracicaba	22°47'00"	47°58'00"	591
8	Dois Córregos	22°22'00"	48°23'00"	719
9	Andradina	20°55'00"	51°22'00"	370
10	Cardoso	20°08'00"	49°58'00"	420
11	Ipaussu	23°01'45"	49°34'05"	624
12	Ituverava	20°20'00"	47°46'00"	578
13	Assis	22°34'34"	50°39'16"	579
14	Mirandópolis	20°56'00"	51°07'00"	420
15	Fernandópolis	20°18'00"	50°15'00"	520
16	Paraguaçu Paulista	22°25'15"	50°34'16"	491
17	Penápolis	21°26'00"	50°04'00"	430
18	Pradópolis	21°21'48"	48°03'51"	540
19	Queiróz	21°48'00"	50°14'00"	430
20	São Carlos	21°44'53"	47°46'06"	620
21	Valparaíso	21°15'00"	50°52'00"	400
22	Potirendaba	21°02'37"	49°22'29"	489
23	Orindiúva	20°10'50"	49°22'03"	500
24	Franca	20°31'00"	47°24'00"	1020
25	Barretos	20°37'40"	48°48'39"	520
26	Colômbia	20°14'21"	48°39'09"	500
27	São João da Boa Vista	21°57'11"	46°48'29"	740
28	Luis Antônio	21°26'46"	47°53'47"	670
29	Dracena	21°28'01"	51°32'54"	415
30	Jaguariuna	22°42'03"	46°58'55"	570
31	Americana	22°42'43"	47°19'05"	549
32	Itirapina	22°08'54"	47°47'42"	610
33	Campinas	22°50'09"	47°04'16"	710
34	Botucatu	22°49'34"	48°26'15"	781
35	Agudos	22°28'36"	48°59'39"	606
36	Marília	22°12'45"	49°56'04"	640
37	Pirajuí	22°03'00"	49°37'00"	550
38	Presidente Prudente	22°06'00"	51°23'00"	460
39	Teodoro Sampaio	22°31'00"	52°11'00"	350

“Continua”

“Continuação”

ID	Município	Latitude	Longitude	Alt
40	Itapetininga	23°34'46"	48°02'36"	650
41	Taquarituba	23°32'19"	49°14'47"	600
42	Borborema	21°42'00"	49°02'00"	420
43	Vista Alegre do Alto	21°09'24"	48°37'44"	590
44	Orlândia	20°44'47"	47°53'24"	680
45	Altinópolis	21°01'00"	47°24'00"	1030
46	Avaré	23°05'58"	48°54'44"	780
47	Auriflama	20°42'00"	50°33'00"	450
48	Tanabi	20°28'39"	49°34'38"	510
49	Presidente Venceslau	21°52'43"	51°50'18"	400
50	Itapeva	23°57'45"	48°56'57"	620

Para se confeccionar os mapas do NDT para o estado de São Paulo, os valores dessa variável determinados pelos critérios específicos por região e pelos critérios gerais foram correlacionados, por meio de estudo de regressão linear múltipla, com as coordenadas geográficas (latitude - ϕ e longitude - λ) e altitude (ξ) de cada local, bem como com a integração dessas e seus valores ao quadrado (ϕ^2 , λ^2 e ξ^2):

$$NDT = a + b\phi + c\lambda + d\xi + e\phi\lambda + f\phi\xi + g\lambda\xi + h\phi^2 + i\lambda^2 + j\xi^2 + \varepsilon \quad (4.1)$$

em que: a é o coeficiente linear da equação de regressão; b , c , d , e , f , g , h , i e j são os coeficientes angulares da equação de regressão múltipla; e ε o erro associado às estimativas.

O modelo linear multivariado gerado para o NDT, proveniente dos critérios específicos por região e aquele proveniente dos critérios gerais, foi processado no sistema de informações geográficas (SIG) ArcGis 10.3.

Primeiramente foram obtidas as imagens do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), em formato GEOTIFF (16 bits), referentes ao modelo digital de elevação (MDE) do terreno de todo o estado de São Paulo (EMBRAPA, 2011), conforme apresentado na Figura 4.2.

Articulação compatível com a escala 1:250.000 (IBGE)

Os modelos estão em Sistema de Coordenadas Geográficas e Datum WGS84.

Figura 4.2 – Códigos das imagens do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), referentes ao modelo digital de elevação (MDE) do terreno de todo o estado de São Paulo

A partir das imagens do SRTM foi obtida uma imagem “composta” para representar todo o estado de São Paulo, utilizando-se para tanto a opção “Mosaic” do ArcGis 10.3, a qual é acessada após a seguinte sequência de comandos: *ArcToolBox*; *Data Management Tools*; *Raster*; *Mosaic*. A imagem resultante tinha uma resolução espacial (grid) de 90 m e estava georreferenciada originalmente no sistema de projeção DATUM WGS 84.

Como as imagens do SRTM são relativas à altitude média do terreno em cada pixel, foi necessário para a obtenção dos “layers” de latitude e longitude, extrair os pontos centrais dos pixels por meio da ferramenta *Add XY Coordinates*. As latitudes e longitudes foram geradas a partir do ponto central de cada pixel da imagem *raster* composta do SRTM. Sendo as coordenadas de latitude e longitude extraídas do ponto central dos pixels, considerando que o estado de São Paulo possui uma área de 248.221,996 km² (IBGE, 2017) e cada pixel possui uma área quadrada de 90 X 90 m, ou seja, 0,0081 km², foram gerados 30.644.691 pontos.

Após o procedimento de determinação dos *layers* de latitude, longitude e altitude para cada pixel, foi possível se iniciar a espacialização do NDT.

Os mapas de latitude e longitude, juntamente com o de altitude (obtido diretamente da imagem SRTM), foram empregados na confecção dos mapas de NDT para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, determinados pelos critérios específicos e gerais por meio da álgebra de mapas, conforme sugerido por Yamada (2011).

O termo "Álgebra de Mapas" é utilizado na literatura de geoprocessamento e sensoriamento remoto para definir o conjunto de operadores para manipulação dos campos geográficos (imagens, mapas temáticos e modelos numéricos de terreno) (Barbosa, 1997).

Por meio da sequência de comandos *Spatial Analyst – Options* e *Spatial Analyst – Raster Calculator* no ArcGis 10.3, os modelos lineares de estimação do NDT em função da latitude, longitude e altitude foram transformados em mapas.

Os mapas de NDT para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, considerando-se os dois tipos de critérios avaliados, foram validados por meio da comparação dos NDTs médios obtidos do mapa e aqueles calculados para 16 locais bem distribuídos no estado de São Paulo e que não foram empregados na confecção dos modelos lineares (Tabela 4.2). Os dados meteorológicos dessas localidades foram obtidos da mesma forma daqueles que constam na Tabela 4.1.

Tabela 4.2 – Municípios escolhidos para validação dos mapas.

ID	Município	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	Jales	20°18'00"	50°33'00"	450
2	Pirapozinho	22°16'00"	51°30'00"	470
3	Garça	22°12'00"	49°39'00"	680
4	Salto	23°11'48"	47°17'23"	500
5	Araras	22°15'17"	47°22'34"	677
6	Matão	21°36'00"	48°21'00"	560
7	Batatais	20°53'00"	47°37'00"	860
8	Olímpia	20°36'32"	48°57'32"	530
9	Adamantina	21°41'16"	51°02'31"	440
10	Pederneiras	22°18'44"	48°53'26"	565
11	Itabera	24°03'00"	49°05'00"	680
12	Vargem Grande do Sul	21°50'00"	46°54'00"	750
13	Ourinhos	22°59'00"	49°50'00"	460
14	São José do Rio Preto	20°48'28"	49°22'27"	484
15	Getulina	21°45'00"	50°07'00"	430
16	Santa Albertina	20°02'00"	50°44'00"	410

Para a validação dos mapas foram empregados os seguintes erros e índices estatísticos: erro médio (EM); erro absoluto médio (EAM); índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança de Camargo-Sentelhas (C) e raiz quadrada do erro médio (RQEM) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997; WILLMOTT et al., 1985).

4.3. Resultados e Discussão

A Tabela 4.3 apresenta o número médio de dias trabalháveis determinados pelos critérios específicos e gerais para as 50 localidades avaliadas.

Avaliando a Tabela 4.3 observa-se que a determinação do NDT por meio dos critérios gerais, na maioria dos locais, tende a estimar um maior NDT se comparado aos critérios específicos. Isto pode ser observado também na comparação da média geral de cada critério. Comparando o NDT pelos dois critérios para cada local em termos absolutos, ou seja, considerando-se o valor da diferença entre os modelos sem, contudo, levar em consideração se o valor superestima ou subestima, observa-se que há uma diferença de 25 dias trabalháveis entre os modelos na média. Enquanto que pela subtração simples de cada local há uma diferença de 20 dias trabalháveis na média.

Ainda com base na Tabela 4.3 observa-se que o mapa elaborado com base nos critérios específicos possui maior variação no NDT (203 a 298 dias) se comparado ao mapa com base nos critérios gerais (260 a 290 dias). Em linhas gerais observa-se uma maior amplitude do NDT (95 dias) no mapa com base nos critérios específicos em relação ao mapa com critérios gerais (30 dias).

Tabela 4.3 - Locais e número médio de dias trabalháveis (NDT) determinados pelos critérios específicos e gerais para a colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

ID	Município	NDT - Critérios Específicos	NDT - Critérios Gerais
1	Araraquara	264	277
2	Jaú	250	274
3	Araçatuba	249	289
4	Guariba	257	278
5	Capivari	258	279
6	Clementina	291	284
7	Piracicaba	265	278
8	Dois Córregos	248	273
9	Andradina	268	288
10	Cardoso	297	284
11	Ipaussu	217	270
12	Ituverava	227	270
13	Assis	233	279
14	Mirandópolis	249	288
15	Fernandópolis	289	282
16	Paraguaçu Paulista	259	282
17	Penápolis	294	287
18	Pradópolis	273	273
19	Queiróz	294	281
20	São Carlos	249	272
21	Valparaíso	284	284
22	Potirendaba	266	278
23	Orindiúva	298	284
24	Franca	214	260
25	Barretos	271	284
26	Colômbia	295	282
27	São João da Boa Vista	235	262
28	Luis Antonio	279	279
29	Dracena	260	281
30	Jaguariúna	217	270
31	Americana	225	274
32	Itirapina	247	270
33	Campinas	221	272
34	Botucatu	245	270
35	Agudos	253	277
36	Marília	286	273

“Continua”

“Continuação”

ID	Município	NDT - Critérios Específicos	NDT - Critérios Gerais
37	Pirajuí	296	286
38	Presidente Prudente	265	286
39	Teodoro Sampaio	261	284
40	Itapetininga	257	278
41	Taquarituba	213	269
42	Borborema	270	290
43	Vista Alegre do Alto	258	278
44	Orlândia	227	269
45	Altinópolis	266	266
46	Avaré	203	262
47	Auriflama	244	285
48	Tanabi	292	279
49	Presidente Venceslau	265	286
50	Itapeva	214	271
Média		257	278

No entanto, das 50 localidades avaliadas, 10 delas (Clementina, Cardoso, Fernandópolis, Penápolis, Queiróz, Orindiúva, Colômbia, Marília, Pirajuí e Tanabi) possuem NDT menores quando determinados pelos critérios gerais. Observa-se que, exceto Marília, há agrupamento destes locais em uma mesma região, como é o caso de Clementina, Penápolis, Queiróz e Pirajuí na região centro-oeste do estado, e Cardoso, Fernandópolis, Orindiúva, Colômbia e Tanabi na região norte do estado. Assim sendo, para essas duas regiões (centro-oeste e norte) os critérios gerais para determinação do NDT devem ser empregados em estudos de planejamento de colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar quando se desejar ter maior segurança na operação, uma vez que um menor NDT fará com que haja uma maior quantidade de máquinas para colheita.

Nos municípios de Pradópolis, Luis Antônio, Altinópolis e Valparaíso, os dois critérios geraram o mesmo número médio de dias trabalháveis. Importante ressaltar que essas localidades, Pradópolis, Luis Antônio e Altinópolis pertencem à região nordeste do estado. Nesse caso, pode-se concluir que para esta região do estado ambos os critérios irão gerar NDT idênticos.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados da análise de regressão linear múltipla entre o NDT para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar determinado pelos

critérios específicos por região e as variáveis independentes latitude, longitude e altitude, para as 50 localidades avaliadas.

Tabela 4.4 - Análise de regressão linear múltipla entre o número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, determinado pelos critérios específicos por região para o estado de São Paulo, e as variáveis longitude (X1 = lat), latitude (X2 = long), altitude (X3 = alt) e as combinações dessas (X4 = lat*long, X5 = lat*alt, X6 = long*alt, X7 = lat², X8 = long², X9 = alt²).

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,703465032
R-Quadrado	0,494863052
R-quadrado ajustado	0,381207238
Erro padrão	20,52188791
Observações	50

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	9	16503,28905	1833,698783	4,354049624	0,000528975
Resíduo	40	16845,91533	421,1478832		
Total	49	33349,20438			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-23959,17232	11704,94387	-2,046927572	0,047274183	-47615,74632	-302,5983336	-47615,74632	-302,5983336
Variável X 1	-536,5609744	246,1316121	-2,179975867	0,035203463	-1034,011518	-39,11043039	-1034,011518	-39,11043039
Variável X 2	-715,529649	385,1727284	-1,857685127	0,070585979	-1493,992771	62,93347335	-1493,992771	62,93347335
Variável X 3	2,77314324	3,280369098	0,84537537	0,402929889	-3,856730014	9,403016494	-3,856730014	9,403016494
Variável X 4	-5,833230665	3,918534378	-1,48862562	0,144428388	-13,75288406	2,086422731	-13,75288406	2,086422731
Variável X 5	0,048998975	0,040367984	1,213807838	0,231939552	-0,032587763	0,130585713	-0,032587763	0,130585713
Variável X 6	0,03090524	0,054151085	0,570722448	0,57138033	-0,078538185	0,140348664	-0,078538185	0,140348664
Variável X 7	-5,345998688	3,1046678	-1,721922934	0,092809312	-11,62076637	0,928768997	-11,62076637	0,928768997
Variável X 8	-5,749268189	3,355170878	-1,71355451	0,094351819	-12,53032148	1,031785102	-12,53032148	1,031785102
Variável X 9	-0,000185317	0,00022922	-0,808471163	0,423601932	-0,000648588	0,000277953	-0,000648588	0,000277953

Com base nos coeficientes apresentados na Tabela 4.4, chegou-se à equação (4.2), a qual foi utilizada para gerar o mapa de NDT com base nos critérios específicos por região do estado de São Paulo. Para esse modelo linear de NDT, o erro padrão foi de 20,5 dias, o qual pode ser considerado um erro relativamente pequeno diante da magnitude do total de NDT médio ao longo do ano (257dias). Apesar desse erro ser equivalente a quase um mês de dias trabalháveis, ele está distribuído ao longo do ano de forma que o erro mensal é menor e em geral concentrado no verão quando se tem mais chuvas e, portanto, maior variabilidade no NDT.

$$NDT = -23959,172 - 536,561 \times \text{lat} - 715,533 \times \text{long} + 2,773 \times \text{alt} - 5,8338 \times \text{lat} \times \text{long} + 0,0490 \times \text{lat} \times \text{alt} + 0,0309 \times \text{long} \times \text{alt} - 5,346 \times \text{lat}^2 - 5,749 \times \text{long}^2 - 0,000185 \times \text{alt}^2 \quad (4.2)$$

De forma análoga, a Tabela 4.5 apresenta os resultados da análise de regressão múltipla entre o NDT para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar determinado pelos critérios gerais para o estado e as variáveis independentes latitude, longitude e altitude, para as 50 localidades avaliadas.

Tabela 4.5 - Análise de regressão linear múltipla entre o número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, determinado pelos critérios gerais para o estado de São Paulo, e as variáveis: longitude (X1 = lat); latitude (X2 = long); altitude (X3 = alt); e as combinações dessas (X4 = lat*long, X5 = lat*alt, X6 = long*alt, X7 = lat², X8 = long², X9 = alt²).

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,888117317
R-Quadrado	0,788752369
R-quadrado ajustado	0,741221652
Erro padrão	3,782909443
Observações	50

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	9	2137,276502	237,4751669	16,59458177	6,3568E-11
Resíduo	40	572,4161542	14,31040385		
Total	49	2709,692656			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-5232,060541	2157,634954	-2,424905349	0,019921291	-9592,803449	-871,3176335	-9592,803449	-871,3176335
Variável X 1	-118,8998132	45,3707575	-2,620626584	0,012347472	-210,5975346	-27,2020918	-210,5975346	-27,2020918
Variável X 2	-161,7038645	71,0009507	-2,277488723	0,028177088	-305,2021387	-18,20559038	-305,2021387	-18,20559038
Variável X 3	0,779547906	0,604687994	1,289173779	0,204743184	-0,442572117	2,00166793	-0,442572117	2,00166793
Variável X 4	-1,663398099	0,722324416	-2,302840748	0,026568881	-3,1232702	-0,203525998	-3,1232702	-0,203525998
Variável X 5	0,011766606	0,007441246	1,581268093	0,12169282	-0,003272714	0,026805926	-0,003272714	0,026805926
Variável X 6	0,01048751	0,009981959	1,050646444	0,299727333	-0,009686782	0,030661802	-0,009686782	0,030661802
Variável X 7	-0,722527082	0,572300034	-1,262497012	0,214081018	-1,879188596	0,434134431	-1,879188596	0,434134431
Variável X 8	-1,19862484	0,618476607	-1,938027771	0,059700953	-2,448612689	0,05136301	-2,448612689	0,05136301
Variável X 9	-3,44742E-05	4,22533E-05	-0,815893425	0,419393314	-0,000119871	5,09229E-05	-0,000119871	5,09229E-05

Com base nos coeficientes apresentados na Tabela 4.5, chegou-se à equação (4.3), a qual foi utilizada para gerar o mapa de NDT com base nos critérios gerais para o estado de São Paulo.

$$NDT = -5232,06 - 118,998 \times \text{lat} - 161,704 \times \text{long} + 0,779 \times \text{alt} - 1,663 \times \text{lat} \times \text{long} + 0,0118 \times \text{lat} \times \text{alt} + 0,0105 \times \text{long} \times \text{alt} - 0,722 \times \text{lat}^2 - 1,199 \times \text{long}^2 - 0,0000345 \times \text{alt}^2 \quad (4.3)$$

Para esse modelo linear de NDT, o erro padrão foi de 3,8 dias, o qual pode ser considerado um erro muito baixo diante da magnitude do total de NDT médio ao longo do ano (278 dias), representando menos de 2%, o que mostra, a princípio, um melhor desempenho dos critérios gerais em relação aos critérios específicos por região.

O coeficiente de correlação de Pearson (R), que indica o quanto da variação do NDT calculado é explicado pelo modelo linear, também é maior quando se emprega os critérios gerais ($R = 0,88$) do que quando se usa os critérios específicos por região ($R = 0,70$) na determinação do NDT.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os mapas do NDT para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, considerando-se, respectivamente, os critérios específicos por região e os critérios gerais para o estado. Esses mapas mostram uma grande variação espacial do NDT, ambos indicando um aumento dessa variável do sul para o norte e do leste para oeste do estado. Isso mostra que a integração dos resultados com o SIG foi útil para criar mapas georreferenciados que facilitam as interpretações das informações, assim como observado por Shahbazi e Jafarzadeh (2010) em estudo sobre o tempo de trabalhabilidade de máquinas agrícolas em função das características do solo e dos dados de chuva.

Cooper et al. (1997) estudaram a influência de mudanças climáticas na trabalhabilidade do solo e disponibilidade de dias trabalháveis na Escócia e encontraram valores médios de 318 dias trabalháveis considerando o clima atual e 310 dias considerando um cenário de mudanças climáticas devido ao aquecimento global. Apesar de este estudo ter sido conduzido em um país europeu (hemisfério norte) os valores de NDT encontrados são próximos aos encontrados quando se determinou o NDT pelos critérios específicos para a região noroeste do estado.

Comparando-se os mapas das Figuras 4.5 e 4.6, são observadas diferenças expressivas, como, por exemplo, no caso das regiões sul do estado e no Pontal do Paranapanema, que apresentaram cerca de 40 a 45 dias a menos no NDT no mapa gerado a partir dos critérios específicos por região. De um modo geral, observa-se que o NDT determinado pelo critério específico por região tende a gerar maior amplitude dos resultados, com o NDT variando de cerca de 220 a mais de 300 dias (Figura 4.5), enquanto que o mapa de NDT gerado com os critérios gerais para o estado apresenta uma variação de 255 a 295 dias (Figura 4.6).

Figura 4.5 – Número de dias trabalháveis (NDT) para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, determinado com base nos critérios específicos por região e no modelo linear em função da latitude, longitude e altitude

Fernandes et al. (2000), estudando o número de dias trabalháveis para as operações como máquinas em florestas plantadas em função de variáveis meteorológicas, obtiveram 170 dias potencialmente úteis no município de Guanhães, MG. Esse número reduzido de dias trabalháveis se deu pelo fato das operações com máquinas estudadas terem movimentação do solo e não apenas no tráfego, como considerado no presente estudo.

Ahaneku e Onwualu (2007) no desenvolvimento de um modelo de simulação para prever o número de dias trabalháveis para operações de colheita no Norte da Nigéria Central obtiveram 155 dias trabalháveis em solos arenosos e 150 dias trabalháveis calculados pelo modelo de simulação para esta mesma condição de solo no período de abril a outubro. Na condição de solos argilosos, os autores

reportaram 115 dias trabalháveis observados contra 127 dias trabalháveis estimados no mesmo período do ano.

Figura 4.6 – Número de dias trabalháveis (NDT) para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, determinado com base nos critérios gerais para o estado (40-03-90) e no modelo linear em função da latitude, longitude e altitude

Rotz e Harrigan (2005) desenvolveram um modelo para verificar o número de dias adequados à colheita a partir de registros climáticos de longo prazo e as características do solo de três locais dos Estados Unidos. Para a região central de Illinois obteve-se 113 dias trabalháveis pelo modelo da ASAE e 111 dias trabalháveis para a simulação por meio do modelo proposto neste estudo. Para a região de Iowa, esses valores foram de 133 dias pelo modelo ASAE e 127 dias para o modelo proposto, enquanto que para o sudeste de Michigan esses valores atingiram 72 e 84 dias, respectivamente.

Para se definir qual dos mapas representa melhor a variação espacial do NDT para colheita da cana-de-açúcar, foi feita a validação dos mapas com dados independentes.

Assim, foram extraídos dos mapas das Figuras 4.5 e 4.6 os valores de NDT correspondentes aos pixels correspondentes às 16 localidades apresentadas na Tabela 4.2. Esses dados, denominados de NDT estimados, foram comparados aos valores de NDT calculados com os critérios específicos e gerais, empregando-se os dados meteorológicos do BHSeq correspondentes de cada localidade.

A Tabela 4.6 apresenta os valores de NDT calculados e estimados para as 16 localidades empregadas na validação dos mapas, considerando-se os critérios regionais e gerais.

Tabela 4.6 – Número de dias trabalháveis (NDT) médios anuais considerando-se os critérios específicos por região (CR) e os critérios gerais (CG) para sua determinação, nas diferentes localidades do estado de São Paulo, usadas na validação dos mapas

usadas na validação dos mapas							
ID	Município	CR	CG	NDTCalc- CR	NDTCalc- CG	NDTEst- CR	NDTEst- CG
1	Jales	40-05-90	40-3-90	293	285	303	286
2	Pirapozinho	40-03-80		259	281	273	281
3	Garça	40-07-90		284	271	284	277
4	Salto	40-03-70		229	278	253	274
5	Araras	80-03-90		256	271	264	272
6	Matão	80-03-90		273	285	286	277
7	Batatais	40-03-70		221	265	273	269
8	Olímpia	40-07-90		296	283	296	279
9	Adamantina	40-03-90		286	286	293	286
10	Pederneiras	40-03-80		254	277	287	281
11	Itabera	40-03-70		186	255	202	259
12	Vargem Grande do Sul	40-03-80		244	270	254	268
13	Ourinhos	40-03-70		221	272	278	282
14	São José do Rio Preto	80-03-90		264	278	299	282
15	Getulina	40-07-90		298	285	298	284
16	Santa Albertina	40-07-90		301	288	298	287
Média				260	277	278	278

Na Tabela 4.7 é apresentada a análise estatística da validação dos mapas de NDT, gerados a partir dos critérios regionais e gerais. Observa-se que os resultados provenientes do mapa gerado a partir dos critérios gerais apresentaram menores erros (EAM = 3,4 dias; RQEM = 4,4 dias) do que o mapa obtido com os critérios regionais (EAM = 17,8 dias; RQEM = 24,9 dias). Além disso, o EM do mapa

gerado pelos critérios regionais foi de mesma magnitude do EAM, o que indica erros sistemáticos, resultando em menor acurácia das estimativas, com $d = 0,81$, enquanto que d do mapa gerado com os critérios gerais foi de $0,92$. Finalmente, ao se avaliar os valores do índice de confiança C , se observa que o desempenho das estimativas de NDT pelo mapa gerado pelos critérios gerais foi classificado como muito bom ($C = 0,80$), de acordo com Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 4.7 - Erro médio (EM), erro absoluto médio (EAM), índice concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), índice de confiabilidade (C), raiz quadrada do erro médio (RQEM, dias) das estimativas do número de dias trabalháveis para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, considerando-se os valores extraídos dos mapas para os critérios específicos regionais e os critérios gerais (40-03-90).

Indicadores de Desempenho	Crítérios Regionais	Crítérios Gerais
NDT calculado médio	260±33,4	277±9,1
NDT estimado médio	278±25,6	278±7,8
n	16	16
EM (dias)	-17,2	-0,9
EAM (dias)	17,8	3,4
d	0,81	0,92
R^2	0,70	0,76
R	0,84	0,87
C	0,68	0,80
RQEM (dias)	24,9	4,4

O melhor desempenho do modelo linear de NDT determinado pelos critérios gerais, possivelmente, se deve à alternância de critérios para se determinar o NDT com os critérios regionais, o que nem sempre representa a realidade, já que as regiões determinadas pela espacialização pelo método de Voronoi são muito grandes, envolvendo diferentes tipos de solos, mudando os limiares de CAD e de ARM/CAD para definição do NDT. Já o modelo geral, por representar em média o que ocorre em todo o estado acaba por gerar erros de menor magnitude.

Avaliando o coeficiente de correlação (R), $R = 0,84$ para os critérios regionais e $R = 0,87$ para os critérios gerais, conclui-se que os dados possuem uma correlação linear positiva e, com base nos valores, pode ser considerada uma boa correlação já que os valores são próximos de 1.

Outro ponto que chama a atenção refere-se ao desvio padrão existente no mapa obtido por meio dos critérios regionais, 33,4 dias para dados calculados e 25,6 dias para os dados estimados, enquanto que no mapa com base nos critérios gerais estes desvios são de 9,1 e 7,8 dias, respectivamente. Isso mostra que o mapa elaborado por meio dos critérios regionais possui maior variação no NDT se comparado ao mapa com base nos critérios gerais.

Portanto, com base na avaliação dos índices estatísticos é possível concluir que o mapa gerado a partir dos critérios gerais apresenta menores erros, melhor desempenho e confiabilidade, sendo mais recomendado para se avaliar o NDT para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

4.4. Conclusões

De acordo com os resultados apresentados, o presente estudo permite concluir que:

- Os mapas gerados a partir da análise de regressão linear múltipla são uma ferramenta adequada para se espacializar o NDT para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, especialmente quando são empregados os critérios gerais para definição de um dia ser trabalhável, ou seja, $CAD = 40 \text{ mm}$, $PREC < 3 \text{ mm}$ e $ARM/CAD < 90\%$;
- O NDT médio varia espacialmente no estado de São Paulo, aumentando de sul para norte e de leste para oeste, com valores oscilando de 203 a 298 pelo mapa com base nos critérios regionais e 260 a 290 pelo mapa com base nos critérios gerais.

Referências

AHANEKU, I. E.; ONWUALU, A. P. Predicting suitable field workdays for soil tillage in north central Nigeria. **Nigerian Journal of Technology**, v. 26 n.1, March 2007.

ASSIS, S. V. **Modelo para estimar o número de dias trabalháveis com tratores agrícolas em função dos parâmetros do solo e do clima**. Viçosa: UFV, 1988, 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1988.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, D.M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 297 p. (FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, 56).

ATAÍDE, L. T.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; SILVA D. A. B.; SOUZA, J. R. P. The probability of potentially useful work days during the year in Londrina. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 6, p. 2215-2226, nov./dez. 2012.

BARBOSA, CLÁUDIO CLEMENTE FARIA. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento**. 1997. 161p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ministério da Ciência e Tecnologia, 1997.

BARDIN, L.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; MORAES, J. F. L. Estimativa das temperaturas máximas e mínimas do ar para a região do Circuito das Frutas, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**. Ambiental, v.14, n.6, p.618–624, 2010.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MALUF, J. R. T.; MATZENAUER, R. Coordenadas geográficas na estimativa das temperaturas máxima e média decendiais do ar no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.9, p.2448-2456, dez, 2008.

CARVALHO, A. L.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; PORFIRIO, A. C. S.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; SANTOS, M. A.; WANDERLEY, H. S. Probabilidade de ocorrência de períodos secos para a região de Rio Largo, Alagoas. **XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Belo Horizonte, 2009.

CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. R. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. E. M. Uso de imagens de radar na espacialização da temperatura do ar. **IDESIA**. v. 28, n. 3, 2010.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2001. 155p.

COOPER, G.; MCGECHAN, M. B.; VINTEN, A. J. A. The Influence of a Changed Climate on Soil Workability and Available Workdays in Scotland. **Journal of Agricultural Engineering Research**. n. 68, p. 253-269, 1997.

DAEE. Portal do Departamento de Águas e Energia – **Banco de dados hidrológicos**. Disponível em: < <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>>. Acesso em 28/11/2016.

DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.175- 182, 1996.

EMBRAPA/CNPq. Agência de informação da Embrapa – cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, 2007. Disponível em: <http://www.agencia.cnpq.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG01_33_711200516717.html>. Acesso em: 15 set. 2011

ESTRADA, J. S.; SCHLOSSER, J. F.; FARIAS, M. S.; SANTOS, G. O.; RÜDELL, I, Y. P. Metodologia para estimar o número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas. **Revista Ceres**, v. 62, n. 4, p. 410-414, 2015.

FERNANDES, H. C.; SOUZA, A. P.; VITÓRIA, E. L. Determinação dos dias potencialmente úteis para o trabalho com máquinas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, n. 3, p.269-274, 2000.

FONI, A.; SEAL, D. Shuttle Radar Topography Mission: an innovative approach to shuttle orbital control. **Acta Astronautica**, Elmsford, v. 54: p. 565-570. 2004.

IBGE, **Estados**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=sp>>. Acesso em 28/02/2017.

LIRA, M. A. T.; SILVA, E. M.; ALVES, J. M. B. Estimativa dos recursos eólicos no litoral cearense usando a teoria da regressão linear. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.3, 349 - 366, 2011.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PIEDADE, S. M. S. Probabilidade de sequência de dias trabalháveis com máquinas como subsídio ao planejamento de operações agrícolas na região de Piracicaba, SP. **XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia** – Julho de 2011 – SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari – ES. 2011. 5p.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PIEDADE, S. M. S. Dias trabalháveis para o manejo do solo em função da chuva e da disponibilidade hídrica do solo em diferentes regiões brasileiras. **Revista Ambiente & Água**. v. 9 n. 3, 2014.

NASA POWER. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) - **Climatology Resource for Agroclimatology**. Disponível em: < <https://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/cgiwrap/solar/agro.cgi?email=agroclim@larc.nasa.gov>>. Acesso em: 13/11/2016.

YAMADA, E. S. M. **Zoneamento agroclimático da *Jatropha curcas* L. como subsídio ao desenvolvimento da cultura no Brasil visando à produção de biodiesel**. 2011. 135 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2011.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Journal of Photogrammetry e Remote Sensing** (ISPRS), v. 57. p. 241-262. 2003.

ROTZ, C. A.; HARRIGAN, T. M. Predicting suitable days for field machinery operations in a whole farm simulation. Applied Engineering in Agriculture. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 21, n. 4. p. 563–571. 2005.

SEVERIANO, Eduardo da Costa. **Indicadores de qualidade estrutural na avaliação da compactação do solo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar**. 2007. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG.

SHAHBAZI, F.; JAFARZADEH, A. A. Land management planning concerning to workability timing of soil in Souma area, using Aljarafe model. **19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World**. 1 - 6 August. 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L.; FOLONI, J.S.S. (Coord.). **Qualidade física do solo: métodos de estudo – sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. p.1-20.

SOUZA FILHO, C. R. O relevo das Américas como nunca antes visto. **Infogeo**, n. 30, p. 54-58. 2003.

SUN, G.; RANSON, K. J.; KHARUK, V. I.; KOVACS, K. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. **Remote Sensing of Environment**, v. 88. p. 401-411. 2003.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in **Climatology**, vol. VIII, n.1)

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.

5. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE SEQUÊNCIA DE DIAS TRABALHÁVEIS PARA COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO, POR MEIO DA CADEIA DE MARKOV

Resumo

A definição das probabilidades de dias trabalháveis, bem como da probabilidade de se ter uma dada sequência de dias para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, são informações muito úteis para o planejamento da operação que passa pelo dimensionamento do número de máquinas até dos custos dessa operação. Desta forma, o objetivo deste estudo foi determinar as probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar para dez regiões produtoras do estado de São Paulo e, por meio da Cadeia de Markov, definir as probabilidades de ocorrência de sequências de dias trabalháveis para essa operação. O número de dias trabalháveis (NDT) foi determinado para uma série histórica de 32 anos (1982 a 2013) para cada uma das dez localidades empregando-se os critérios gerais, ou seja, capacidade de água disponível do solo (CAD) de 40 mm, chuva (PREC) de 3 mm e armazenamento relativo de água no solo (ARM/CAD) de 90%. Com base nos dados de NDT foram determinadas as probabilidades simples de um dia ser trabalhável (T) e não trabalhável (NT), e as probabilidades condicionais de um dia ser trabalhável dado que o anterior foi trabalhável (T|T), trabalhável dado que o anterior foi não trabalhável (T|NT), não trabalhável dado que o anterior foi trabalhável (NT|T) e não trabalhável dado que o anterior foi não trabalhável (NT|NT). Finalmente, determinou-se a probabilidade da sequência de dias trabalháveis por decêndio, aplicando-se a cadeia de Markov. Os resultados mostraram que as regiões mais a oeste, noroeste e norte do estado, em média, apresentam maiores probabilidades de ocorrência de dias trabalháveis se comparado às regiões sul e leste do estado. Além disso, os períodos de maiores probabilidades de dias trabalháveis estão entre os meses de abril e setembro sendo o período de maior probabilidade o primeiro decêndio de julho. Com base nesses resultados, concluiu-se que o dimensionamento de frota de colhedoras deve se basear no NDT, porém levando-se em conta também a probabilidade da sequência de dias trabalháveis em dado decêndio.

Palavras-chave: Probabilidade simples; Probabilidade condicional; Número de dias trabalháveis; Capacidade de água disponível do solo; Chuva; Armazenamento relativo de água no solo

Abstract

The probabilities of workable days, as well as the probability of having a given sequence of days for sugarcane mechanized harvest in the state of São Paulo, are very useful information for planning its operation, which goes from the dimensioning of the number of machines to its costs. Thus, the objective of this study was to determine the simple and conditional probabilities of workable days for the mechanized harvest of sugarcane for ten producing regions of the state of São Paulo and, through the Markov Chain, to define the probabilities of occurrence of sequences of workable days for this operation. The number of workable days (NWD) was determined for a historical series of 32 years (1982 to 2013) for each of the ten localities using the general criteria, i.e. soil water holding capacity (SWHC) of 40 mm, Rainfall (PREC) of 3 mm and relative soil water storage (ARM/SWHC) of 90%. Based on the NWD data, the simple probabilities of workable (WD) and non-workable (NW) days, as well as the conditional probabilities of one day being workable since the former was workable (WD|WD), workable since the former was non-workable (WD|NW), non-workable since the former was workable (NW|WD) and non-workable since the former was non-workable (NW|NW) were determined. Finally, the probability of sequences of working days per ten-day period was determined by applying the Markov chain. The results showed that the western, northwestern and northern regions of the state, on average, are more likely to have workable days compared to the southern and eastern regions of the state. In addition, the most likely periods of workable days are between the months of April and September, with the most likely period being the first ten days of July. Based on these results, it was concluded that the dimensioning of harvest machines should be based on the NWD, but taking into account also the probability of the sequence of workable days in a given ten-day period.

Keywords: Simple probability; Conditional Probability; Number of workable days; Available soil water capacity; Rain; Relative storage of water in soil

5.1. Introdução

As operações agrícolas de campo são altamente dependentes das condições meteorológicas e de umidade do solo, as quais definem se dada operação poderá ser realizada ou não (MONTEIRO et al., 2014). Uma das formas de se determinar a probabilidade da sequência de dias favoráveis à realização de uma determinada operação com máquinas no campo é por meio do método conhecido como Cadeia de Markov. Segundo Bonini (2004), o princípio básico no qual se baseia a Cadeia de Markov é que a probabilidade de um determinado dia encontrar-

se em um estado particular depende do estado do dia precedente. Isso se aplica muito bem a situações que dependem da chuva como variável condicionadora, já que a sua ocorrência em um dado dia pode afetar as condições de umidade do solo por vários dias.

Na maioria dos estudos disponíveis na literatura se utiliza a cadeia de Markov de primeira ou de segunda ordem. Todavia, o uso de cadeias de Markov de ordem superior a dois é de grande importância, pois, em certas regiões, a ocorrência de chuva em um dia pode ser condicionalmente dependente da sequência de dias secos e chuvosos em vários dias anteriores. Isto pode acontecer, por exemplo, em regiões onde, em certas épocas, é frequente a ocorrência de vários dias consecutivos de chuva ou longas séries de dias secos (KELLER FILHO et al., 2006).

Em um trabalho pioneiro, Gabriel e Neumann (1962), citados por Keller Filho et al. (2006), utilizaram cadeias homogêneas de Markov para descrever a alta persistência de dias secos consecutivos em Tel Aviv, Israel. Outro trabalho pioneiro foi o de Stern e Coe (1982), que definiram um modelo de simulação para a precipitação pluvial diária, no qual a ocorrência de dias chuvosos é gerada por uma cadeia de Markov, e a quantidade de chuva é gerada por uma distribuição gama. Esse modelo foi aperfeiçoado, utilizando-se séries de Fourier para representar as probabilidades de transição (STERN; COE, 1984).

Andrade Junior et al. (2001), objetivando simular a precipitação pluviométrica diária para as regiões de Parnaíba e Teresina, PI, utilizando um processo de simulação baseado no método de Monte Carlo, determinaram a precipitação por meio da cadeia de Markov e a magnitude desta pelas funções de distribuição de probabilidades gama e empírica. Esses autores verificaram que o modelo utilizado proporcionou estimativas com excelente precisão e exatidão.

Keller Filho et al. (2006), estudando se as ocorrências de dias secos e chuvosos são condicionalmente dependentes da sequência dos três dias secos e chuvosos anteriores, numa zona pluviometricamente homogênea, observaram por meio da cadeia não-homogênea de Markov de terceira ordem que as probabilidades diárias de transição podem ser adequadamente estimadas, com base em dados agregados bimestralmente, seguidas de interpolação por meio de funções sinusoidais. Além disso, constataram evidências de que, naquela zona, as ocorrências diárias de chuva são condicionalmente dependentes da sequência de dias secos e chuvosos nos três dias anteriores. Por fim, concluíram que a cadeia

não homogênea de Markov de terceira ordem é um importante instrumento para a análise da dependência entre as sequências de dias secos e chuvosos em determinadas regiões.

Com relação ao uso da cadeia de Markov para a avaliação das probabilidades de dias úteis ao trabalho com máquinas, Ataíde et al. (2012) observaram que esse método foi eficaz para essa finalidade.

Monteiro et al. (2014), estudando os dias trabalháveis para o manejo do solo em função da chuva e da disponibilidade hídrica do solo em diferentes regiões brasileiras, determinaram as probabilidades condicionais de dias consecutivos aptos às atividades mecanizadas por meio da cadeia de Markov em cada decêndio ao longo do ano e concluíram que a utilização da cadeia de Markov para o estudo dessa natureza é uma ferramenta importante para o planejamento dos períodos mais adequados ao emprego de máquinas para o preparo e manejo do solo, auxiliando no dimensionamento de frotas.

Considerando-se a importância da determinação da probabilidade de ocorrência de dias trabalháveis, bem como da probabilidade de ocorrência de uma dada sequência desses dias para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, a técnica da Cadeia de Markov se constitui em uma importante ferramenta para o planejamento dessa operação, o que engloba desde a definição do número de máquinas a serem adquiridas até o planejamento dos custos desta operação.

Dessa forma, o objetivo deste estudo foi aplicar a técnica da Cadeia de Markov para a determinação das probabilidades simples e condicionais de ocorrência de dias trabalháveis, assim como as probabilidades de sequências de dias úteis para a realização da colheita mecanizada da cana-de-açúcar em dez regiões produtoras do estado de São Paulo.

5.2. Material e Métodos

Este estudo foi realizado considerando-se dez localidades representativas de regiões produtoras de cana-de-açúcar, as quais são apresentadas na Tabela 5.1 e Figura 5.1. Para essas localidades foram levantados dados meteorológicos diários para uma série de 32 anos (1982-2013), provenientes das bases do DAEE/SP (chuva diárias) e do sistema NASA/POWER (temperaturas máxima e mínima, umidade relativa média, radiação solar e velocidade do vento). Os dados

provenientes do NASA/POWER foram empregados na estimação da evapotranspiração de referência (ET_o), de acordo com o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Os dados de ET_o e de chuva foram utilizados na elaboração dos balanços hídricos sequenciais (BHSeq) diários, de acordo com o método de Thornthwaite e Mather (1955) para cada uma das localidades, considerando-se as capacidades de água disponível no solo (CAD) de 40 e 80 mm. Esses balanços hídricos foram utilizados para definir o armazenamento relativo de água no solo (ARM/CAD) para cada dia do ano.

Tabela 5.1 – Localidades representativas de regiões produtoras de cana-de-açúcar para avaliação das probabilidades de ocorrência de sequência de dias trabalháveis para colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, por meio da cadeia de Markov.

ID	Município	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	Araçatuba	21°13'44"	50°46'32"	320
2	Dois Córregos	22°22'00"	48°23'00"	719
3	Andradina	20°55'00"	51°22'00"	370
4	Ipaussu	23°01'45"	49°34'05"	624
5	Ituverava	20°20'00"	47°46'00"	578
6	Paraguaçu Paulista	22°25'15"	50°34'16"	491
7	Pradópolis	21°21'48"	48°03'51"	540
8	Piracicaba	22°48'03"	47°39'45"	591
9	Potirendaba	21°02'37"	49°22'29"	489
10	Cardoso	20°08'00"	49°58'00"	420

Os dados de CAD, chuva (PREC) e ARM/CAD foram empregados na definição do número de dias trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar (NDT), considerando-se os critérios gerais, de acordo com os quais um dado dia é trabalhável quando, para a CAD de 40 mm, a PREC < 3 mm e o ARM/CAD < 90% (40-03-90). Assim, definiu-se para cada uma das dez localidades a quantidade de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) com base nos quais foram calculadas as probabilidades simples de um dia ser trabalhável (P(T)) ou não trabalhável (P(NT)) para cada um dos 36 decêndios do ano. Considerando ainda a quantidade de T e NT foram determinadas as probabilidades condicionais, ou seja: probabilidade de um dia ser trabalhável dado que o anterior foi trabalhável (P(T|T)); probabilidade de um dia ser trabalhável dado que o anterior foi não trabalhável

($P(T|NT)$); probabilidade de um dia ser não trabalhável dado que o anterior foi trabalhável ($P(NT|T)$); probabilidade de um dia ser não trabalhável dado que o anterior foi não trabalhável ($P(NT|NT)$), conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Matriz de 1ª ordem para análise das probabilidades condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) por meio da Cadeia de Markov.

Dia Atual	Dia Anterior	
	Condição T	Condição NT
Condição T	$P(T T)$	$P(T NT)$
Condição NT	$P(NT T)$	$P(NT NT)$

Figura 5.1 – Municípios nos quais haviam dados observados para determinação do número de dias trabalháveis (NDT) e locais escolhidos para análise da Cadeia de Markov.

Para o cálculo das probabilidades condicionais da Cadeia de Markov utilizou-se as seguintes equações (MONTEIRO et al., 2011; ATAÍDE et al., 2012; MONTEIRO et al., 2014):

$$P(T|T) = \frac{N(T|T)}{N(T|T)+N(NT|T)} = \frac{N(T|T)}{N(T)} \quad (5.1)$$

$$P(NT|T) = \frac{N(NT|T)}{N(T|T)+N(NT|T)} = \frac{N(NT|T)}{N(T)} = 1 - P(T|T) \quad (5.2)$$

$$P(NT|NT) = \frac{N(NT|NT)}{N(T|NT)+N(NT|NT)} = \frac{N(NT|NT)}{N(NT)} \quad (5.3)$$

$$P(T|NT) = \frac{N(T|NT)}{N(T|NT)+N(NT|NT)} = \frac{N(T|NT)}{N(NT)} = 1 - P(NT|NT) \quad (5.4)$$

em que: $N(T|T)$ é o número de dias trabalháveis em que o dia anterior também foi trabalhável; $N(NT|T)$ é o número de dias não trabalháveis em que o dia anterior foi trabalhável; $N(T|NT)$ é o número de dias trabalháveis em que o dia anterior foi não trabalhável; $N(NT|NT)$ - número de dias não trabalháveis em que o dia anterior também foi não trabalhável; $N(T)$ - número total de dias trabalháveis; $N(NT)$ - número total de dias não trabalháveis.

Após o cálculo das probabilidades condicionais, empregou-se uma equação geométrica (Equação 5.5), a qual é função da probabilidade condicional obtida por meio da cadeia de Markov, para a estimação das probabilidades sequenciais médias dos dias trabalháveis em cada decêndio do ano, conforme proposto por Robertson (1976):

$$P(n) = P(T) \times P(T|T)^{n-1} \quad (5.5)$$

em que: $P(n)$ é a probabilidade de ocorrência de “n” dias consecutivos trabalháveis para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

5.3. Resultados e Discussão

As Figuras 5.2 a 5.11 apresentam as probabilidades simples e condicionais bem como as probabilidades de sequências de um a dez dias trabalháveis para as dez localidades analisadas. As Tabelas com os resultados numéricos dessa análise se encontram no Anexo A.

Avaliando-se as Figuras 5.2 a 5.11, em relação às probabilidades simples e condicionais, é possível verificar que em todas as regiões avaliadas o período com maior probabilidade de dias trabalháveis é aquele compreendido entre o terceiro decêndio de Abril e o primeiro decêndio de setembro. No entanto, sistematicamente há no terceiro decêndio de maio uma queda na probabilidade de dias trabalháveis, exceto em Ipaussu e Paraguaçu Paulista. Nesses locais, a queda ocorre no segundo decêndio do mês de maio (Figuras 5.9 e 5.10). Isto pode ser explicado pela ocorrência de frentes frias vindas do sul, que atingem primeiramente as regiões sul e do Vale do Paranapanema, seguindo posteriormente para as demais regiões do estado, promovendo chuvas após sua passagem e aumentando o suprimento de água no solo (MONTEIRO, 1964).

Nas regiões a oeste, noroeste e norte do estado as probabilidades de ocorrência de dias trabalháveis são maiores do que as da região sul, onde se encontram Ipaussu e Paraguaçu Paulista. Outro aspecto a ser observado é que em Ituverava, Potirendaba, Pradópolis e Dois Córregos a probabilidade de dias trabalháveis é igual à probabilidade de dias não trabalháveis para os meses típicos de verão (Janeiro e Fevereiro), enquanto que nas demais localidades a probabilidade de dias não trabalháveis é ligeiramente superior à probabilidade de dias trabalháveis. Esta é uma informação importante a ser considerada quando se planeja a operação de plantio de canaviais nesta época do ano, uma vez que para o plantio há a necessidade da realização da colheita de mudas (FERNANDES, 2011).

Monteiro et al. (2014) obtiveram resultados em Piracicaba para probabilidade de dias favoráveis ao trabalho de manejo do solo variando de 66,6% no primeiro decêndio de abril a 14,1% no terceiro decêndio de agosto, enquanto que a média anual foi de 43,1% e seu desvio padrão de 12,7%. Estes resultados são inferiores aos obtidos neste estudo para a mesma localidade, porém as operações avaliadas foram distintas, uma vez que neste trabalho foi avaliada a operação de colheita, operação esta que pode ocorrer em solos mais úmidos e também mais secos se comparado à operações de manejo do solo que envolvem revolvimento de solo.

Figura 5.2 – Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) (a) e probabilidade da sequência de um ($P(1)$) a dez ($P(10)$) dias trabalháveis consecutivos (b), para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar em Ituverava, SP.

Figura 5.3 – Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) (a) e probabilidade da sequência de um ($P(1)$) a dez ($P(10)$) dias trabalháveis consecutivos (b), para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, em Cardoso, SP.

Figura 5.4 – Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) (a) e probabilidade da sequência de um ($P(1)$) a dez ($P(10)$) dias trabalháveis consecutivos (b), para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, em Araçatuba, SP.

Figura 5.5 – Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) (a) e probabilidade da sequência de um ($P(1)$) a dez ($P(10)$) dias trabalháveis consecutivos (b), para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, em Potirendaba, SP.

Figura 5.6 – Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) (a) e probabilidade da sequência de um ($P(1)$) a dez ($P(10)$) dias trabalháveis consecutivos (b), para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, em Pradópolis, SP.

Figura 5.7 – Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) (a) e probabilidade da sequência de um ($P(1)$) a dez ($P(10)$) dias trabalháveis consecutivos (b), para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, em Dois Córregos, SP.

Figura 5.8 – Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) (a) e probabilidade da sequência de um ($P(1)$) a dez ($P(10)$) dias trabalháveis consecutivos (b), para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, em Piracicaba, SP.

Figura 5.9 – Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) (a) e probabilidade da sequência de um ($P(1)$) a dez ($P(10)$) dias trabalháveis consecutivos (b), para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, em Ipaussu, SP.

Figura 5.10 – Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) (a) e probabilidade da sequência de um ($P(1)$) a dez ($P(10)$) dias trabalháveis consecutivos (b), para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, em Paragau Paulista, SP.

Figura 5.11 – Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) (a) e probabilidade da sequência de um ($P(1)$) a dez ($P(10)$) dias trabalháveis consecutivos (b), para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, em Andradina, SP.

Avaliando as probabilidades sequenciais de um a dez dias trabalháveis consecutivos no período de maiores probabilidades, ou seja, de final de abril a início de setembro, observa-se que Ipaussu é a região com menores probabilidades. Para este local, uma sequência de dez dias trabalháveis possui uma probabilidade mínima em torno de 4% e uma probabilidade máxima menor que 20%. Mesmo considerando a sequência de apenas um dia trabalhável há uma probabilidade mínima de 75% no terceiro decêndio de maio e máxima em torno de 91%. Considerando ainda a probabilidade de um dia trabalhável, observa-se que em nenhuma das regiões avaliadas há probabilidade de 100%, sendo que o máximo está em torno de 95% para as regiões de Araçatuba, Potirendaba e Pradópolis.

Em todos os casos avaliados, o aumento de um dia na sequência de dias trabalháveis consecutivos tende a reduzir quase pela metade a probabilidade desta sequência nos meses de janeiro a março. Este percentual de queda diminui à medida que se aproxima dos meses de inverno e volta a aumentar na primavera e verão. Para a região de Araçatuba, os meses de outubro e novembro possuem valores de probabilidade de sequência de dias trabalháveis consecutivos muito próximos, em torno de 5% para uma sequência de dez dias trabalháveis a 78% para uma sequência de apenas um dia trabalhável. Além disso, observa-se que no terceiro decêndio de novembro há uma elevação nesta probabilidade. Este fato é importante no planejamento de moagem desta região, uma vez que se pode considerar um período de colheita maior neste caso quando comparado às outras regiões avaliadas.

Ainda avaliando as Figuras 5.2 a 5.11, nota-se que para as regiões de Araçatuba, Potirendaba, Piracicaba e Ipaussu há uma queda acentuada das probabilidades de sequência de dias trabalháveis no primeiro decêndio de setembro. Já para a região de Pradópolis tal fato ocorre no segundo decêndio deste mesmo mês. Nas demais regiões, Dois Córregos, Paraguaçu Paulista e Andradina, esta queda ocorre no primeiro e terceiro decêndios do mês de setembro.

Carvalho et al. (2009), analisando a probabilidade de ocorrência de períodos secos no município de Rio Largo, AL, utilizou uma série de 30 anos de dados de precipitação pluvial diária (1973 – 2002), definindo o período seco como a sequência de dias secos onde a quantidade mínima de chuva diária foi inferior a 0,85 mm. As análises estatísticas foram feitas com o software *Instat Climatic* e os períodos secos definidos em três diferentes intervalos (≥ 5 dias, ≥ 7 dias e ≥ 10 dias). Dos três

períodos secos analisados o de cinco dias apresentou maior probabilidade de ocorrência (10% a 40%) para todos os anos. Março apresentou probabilidade de 90% de ocorrência de períodos secos de cinco dias estando entre os meses que obtiveram maiores probabilidades de ocorrência (março a agosto), enquanto junho e julho apresentaram, respectivamente, 30% e 20%. A probabilidade de ocorrer um período seco entre cinco e sete dias é de 20% correspondendo a seis anos, entre cinco e dez dias é de 30% (nove anos) e entre sete e dez dias é de 10% (três anos). Esses resultados evidenciam as diferenças climáticas em relação ao estado de São Paulo, uma vez que a colheita da cana-de-açúcar em Alagoas se inicia quando termina a do sudeste. Em relação à ocorrência de períodos secos de cinco dias, observa-se que em São Paulo a probabilidade de se ter uma sequência de cinco dias trabalháveis é menor e situa-se entre 40 e 60%.

Os resultados obtidos por Ataíde et al. (2012), na avaliação das probabilidades de dias úteis ao trabalho com máquinas agrícolas por meio da cadeia de Markov, indicaram que o melhor período para realização de obras em ambiente externo em Londrina, PR, se estende de abril a setembro, com ótimo entre final de julho e início de setembro. Esses resultados corroboram com os obtidos neste trabalho em relação ao período de maior probabilidade de dias trabalháveis compreendido entre abril e setembro. Porém o mês de maior probabilidade encontrado difere de Ataíde et al. (2012), por se situar no primeiro decêndio de julho e não no final de julho e início de setembro como sugerem os autores. Ainda segundo os autores, essas probabilidades possibilitaram determinar as necessidades de máquinas para execução das práticas mecanizadas.

Estrada et al. (2015) concluíram que a maior probabilidade de ocorrência de dias favoráveis ao trabalho com máquinas agrícolas para o município de Santa Maria, mais ao sul do estado do Rio Grande do Sul em relação à probabilidade de dias favoráveis para o município de Passo Fundo, pode ser atribuída às características físico-hídricas do solo. Segundo Kaufmann et al. (2012) em latossolos característicos do município de Passo Fundo, alterações na disponibilidade de água no solo podem ser intensificadas pela dispersão da argila na superfície. A liberação de argila reduz a dimensão dos canalículos do solo pela iluviação de partículas finas, criando um selamento na superfície do solo (Lima Neto et al., 2010). Para este estudo, não se avaliou de forma direta as características do solo, no entanto, os critérios estabelecidos para determinação dos dias trabalháveis

empregaram as características físico-hídricas do solo por meio da avaliação do ARM/CAD e este parâmetro, juntamente com a precipitação, são responsáveis pela variação da probabilidade de dias trabalháveis tal como descrito por Estrada et al. (2015).

Ataíde et al. (2012), ao avaliar as probabilidades de dias úteis ao trabalho com máquinas agrícolas, concluíram que existe uma forte dependência de ocorrer um dia favorável, se este for imediatamente precedido por um dia favorável, e vice-versa. Neste estudo também foram encontrados resultados análogos de forma que a probabilidade do dia ser trabalhável dado que o anterior foi trabalhável manteve-se sempre com o mínimo em torno de 50% de probabilidade e com o máximo próximo de 90% em todas as regiões avaliadas (Figuras 5.2 a 5.11).

5.4. Conclusão

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram concluir que:

- Em regiões mais a oeste, noroeste e norte do estado em média são maiores as probabilidades de ocorrência de dias trabalháveis se comparado à região sul do estado;
- Os períodos de maiores probabilidades de dias trabalháveis estão entre os meses de abril e setembro, sendo o período de maior probabilidade o primeiro decêndio de julho;
- A probabilidade de um dia ser trabalhável dado que o anterior foi trabalhável manteve-se sempre com o mínimo em torno de 50% de probabilidade e com o máximo próximo de 90% em todas as regiões avaliadas.
- O aumento de um dia na sequência de dias trabalháveis consecutivos tende a reduzir quase pela metade a probabilidade desta sequência nos meses de janeiro a março. Este percentual de queda diminui à medida que se aproxima dos meses de inverno e volta a aumentar na primavera e verão.
- Para a região de Araçatuba, no terceiro decêndio de novembro há uma elevação na probabilidade de sequência de dias trabalháveis consecutivos. Este fato é importante no planejamento de moagem desta região uma vez que se pode considerar um período de colheita maior neste caso quando comparado às outras regiões avaliadas.

- Para as regiões de Araçatuba, Potirendaba, Piracicaba e Ipaussu há uma queda acentuada das probabilidades de sequência de dias trabalháveis no primeiro decêndio de setembro. Já para a região de Pradópolis, tal fato ocorre no segundo decêndio deste mesmo mês. Nas demais regiões, Dois Córregos, Paraguaçu Paulista e Andradina, esta queda ocorre no primeiro e terceiro decêndios do mês de setembro.

Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, D.M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 297 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANDRADE JUNIOR, A. S.; FRIZZONE, J. A.; SENTELHAS, P. C. Simulação da precipitação diária para Parnaíba e Teresina, PI, em planilha eletrônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.2, p.271-278, 2001.
- ATAÍDE, L. T.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; SILVA D. A. B.; SOUZA, J. R. P. The probability of potentially useful work days during the year in Londrina. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 6, p. 2215-2226, nov./dez. 2012.
- BONINI, A. S. S. **Aplicação do método cadeia de markov à ocorrência de temperatura mínima do ar no estado do Rio Grande do Sul**. Pelotas, 2004. 113p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Pelotas, 2004.
- CARVALHO, A. L.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; PORFIRIO, A. C. S.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; SANTOS, M. A.; WANDERLEY, H. S. Probabilidade de ocorrência de períodos secos para a região de Rio Largo, Alagoas. **XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Belo Horizonte, MG, 2009.
- ESTRADA, J. S.; SCHLOSSER, J. F.; FARIAS, M. S.; SANTOS, G. O.; RÜDELL, I, Y. P. Metodologia para estimar o número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 62, n.4, p. 410-414, jul-ago, 2015.
- FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 3ª Edição. 2011. 416p.
- GABRIEL, K.R.; NEUMANN, J. A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.88, p.90-95, 1962.

KELLER FILHO, T.; ZULLO JUNIOR, J.; LIMA, P. R. S. R. Análise da transição entre dias secos e chuvosos por meio da cadeia de Markov de terceira ordem. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.41, n.9, p.1341-1349, set. 2006.

KAUFMANN, V; CASTRO, N. M. R.; PINHEIRO, A. Escoamentos superficiais e de drenagem em solo com diferentes manejos e intensidades de chuvas simuladas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 17:273-285, 2012.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S. S.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LIMA, J. F. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de latossolos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 473-486, 2010.

MONTEIRO, C. A. F. Sobre um índice de participação das massas de ar e suas possibilidades de aplicação à classificação climática. **Revista Geográfica**. v. 33, n. 61, p. 59-69, 1964.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PIEDADE, S. M. S. Probabilidade de sequência de dias trabalháveis com máquinas como subsídio ao planejamento de operações agrícolas na região de Piracicaba, SP. **XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia** – Julho de 2011 – SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari – ES. 2011. 5p.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PIEDADE, S. M. S. Dias trabalháveis para o manejo do solo em função da chuva e da disponibilidade hídrica do solo em diferentes regiões brasileiras. **Revista Ambiente & Água**. vol. 9 n. 3 Taubaté - Jul. / Sep 2014.

ROBERTSON, G.W. **Dry and wet spells. Malaysia: Project Field Report**, 1976. 28p.

STERN, R.D.; COE, R. The use of rainfall models in agricultural planning. **Agricultural Meteorology**, v.26, p.35-50, 1982.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in **Climatology**, vol. VIII, n.1)

6. DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE COLHEDORAS PARA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR COM BASE EM DIAS TRABALHÁVEIS – ESTUDO DE CASO PARA AS REGIÕES DE ARAÇATUBA E PIRACICABA, SP

Resumo

O conhecimento do número de dias trabalháveis em operações com máquinas agrícolas é importante para calcular o tempo disponível permitindo o planejamento em relação ao manejo da área. Para se dimensionar o número de frotas agrícolas necessárias à determinada atividade bem como seu custo operacional ou mesmo dimensionar o tempo efetivo disponível para que esta mesma máquina execute determinada tarefa é importante conhecer o conteúdo de água no solo e a influência do clima sobre aquele solo de forma que, conhecendo estas condições, se possa ter a real magnitude de quantos dias efetivamente trabalháveis existem para determinada atividade agrícola. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi, com base no número de dias trabalháveis (NDT) para operação de colheita mecanizada da cana-de-açúcar pelo critérios regionais e gerais previamente estabelecidos, avaliar o impacto dessa variável para o investimento necessário em colhedoras e para o custo operacional do sistema para as regiões de Araçatuba e Piracicaba, SP. Elaborou-se um modelo matemático em planilha eletrônica para o cálculo de variáveis empregadas no dimensionamento do número de colhedoras para determinada situação e do custo para colheita. Após a construção, verificação e validação do modelo, foram realizadas análises de cenários a partir do número de dias trabalháveis e das demais variáveis do sistema. A variação do NDT para as quatro situações analisadas (dois locais e dois critérios de definição do NDT) teve um impacto pouco significativo nos custos de produção e totais. O grande impacto das diferenças de NDT foi sobre o investimento total, uma vez que para a região de Araçatuba a utilização dos critérios gerais superestimou o NDT e subestimou o investimento necessário em 8,2%. Já para a região de Piracicaba pode-se considerar que ambos os critérios para determinação do NDT tiveram resultados similares, causando pouco impacto, da ordem de 1,7%, no investimento total. Para a região de Araçatuba, é recomendável se empregar o critério regional para estimação do NDT, enquanto que para Piracicaba, ambos os critérios podem ser utilizados. Com base nesses resultados, conclui-se que a determinação correta do NDT é fundamental para o dimensionamento de sistemas de colheita da cana-de-açúcar, sendo recomendável analisar a melhor metodologia para cada caso.

Palavras-chave: Critérios agrometeorológicos; Número de dias trabalháveis; Custo fixo; Custos de produção; Investimento total

Abstract

The definition of the number of workable days for agricultural machine operations has a major importance for calculating the available time for such field activity, allowing to have a better planning in relation to area to be managed. In order to determine the number of sugarcane harvest machines as well as the operational cost for this operation or even to estimate the effective time available for the same machine to perform in a certain task, it is important to know the soil water content and the influence of the climate on that soil. So, once knowing these conditions, the effective number of workable days for a given agricultural activity can be determined. In this sense, the objective of this work was, based on the number of workable days (NWD) for sugarcane mechanized harvest, to evaluate the impact of this variable on the required investment in harvest machines and on the operational cost of the system for the regions of Araçatuba and Piracicaba, state of São Paulo, Brazil. A mathematical model was developed in a spreadsheet for the calculation of variables used in the dimensioning of the number of harvesters for a given situation and the cost for that. After the construction, verification and validation of the model, scenarios were analyzed based on the number of workable days and other system variables. The NWD variation for the four analyzed situations (two sites and two criteria for defining NWD) had a negligible impact on production costs and totals. The great impact of the NWD differences was on the total investment, since for the region of Araçatuba the use of general criteria overestimated the NWD, which underestimated the required investment in 8.2%. For Piracicaba region, it can be considered that both criteria for NWD determination had similar results, causing little impact, of 1.7%, on the total investment. For the region of Araçatuba, it is recommended to use the regional criteria for estimating NWD, whereas for Piracicaba, both criteria can be used. Based on these results, it was concluded that the correct determination of NWD is essential for dimensioning sugarcane harvesting systems.

Keywords: Agrometeorological criteria; Number of workable days; Fixed cost; Production costs; Total investment

6.1. Introdução

O crescimento do setor sucroenergético no estado de São Paulo tem sido amparado pela utilização intensiva de máquinas e implementos agrícolas (SOUZA et al., 2005). Isso contribui para aumentar as áreas com problemas de compactação, provavelmente pela ausência de um cronograma de trabalho bem definido ou de modelos capazes de estimar a capacidade de suporte do solo (SOUZA et al.,

2006a). Muitas vezes, o preparo do solo é realizado sem levar em conta sua umidade, a qual é um fator condicionador da compactação (DIAS JÚNIOR, 2000; MONTEIRO et al., 2014).

Dada as questões legais quanto as restrições à queima da cana, a crescente escassez de mão-de-obra, as exigências quanto as condições de trabalho e os novos investimentos em bioeletricidade, a colheita mecanizada de cana-de-açúcar aumentou consideravelmente nos últimos anos. A colheita mecanizada de cana-de-açúcar no estado de São Paulo representa 91,3% do total colhido na safra 2015/2016 (CANAL RURAL, 2016), sendo que o centro-sul canavieiro responde por 92,7% da produção de cana-de-açúcar (CONAB, 2016).

Considerando que a colheita de cana-de-açúcar trata-se de um sistema, o planejamento das operações deve ocorrer de modo coordenado, uma vez que uma decisão sobre um quesito acarreta interferência direta em todo o sistema, dada a forte interação entre os recursos envolvidos. Dessa forma, as tomadas de decisão podem ser auxiliadas pela utilização de simulação computacional, cujas vantagens derivam do conhecimento prévio do desempenho dos sistemas e da possibilidade de manipular cenários para testar situações de interesse (RAMOS DA SILVA et al., 2011).

Segundo Oliveira (2012), no processo de colheita mecanizada a colhedora é quem tem o maior impacto nos custos, devido seu elevado valor de aquisição, seguido pelo consumo de combustível e custo de mão-de-obra. Sendo assim, o autor sugere que o gerenciamento do sistema mecanizado antes e durante a execução da atividade torna-se relevante para a redução dos custos.

Peloia e Milan (2010) propuseram um sistema de medição de desempenho integrado para dar suporte à gestão da mecanização agrícola com adaptação de um modelo conceitual sistêmico, com base no *Balanced Scorecard* (BSC) e aplicação do modelo a um estudo de caso na agroindústria canavieira. Os autores concluíram que a adaptação e a aplicação do modelo conceitual auxiliaram na elaboração do sistema de medição de desempenho para a gestão de sistemas mecanizados e que os indicadores permitiram uma visão integrada da empresa e associada aos objetivos estratégicos.

Diversos modelos para a seleção otimizada de máquinas e conjuntos motomecanizados foram desenvolvidos sendo que em cada um destes tipos, o número de dias adequados para o trabalho de campo é um componente importante

na seleção e análise de sistemas de máquinas. A fim de prever a quantidade de trabalho que pode ser realizado, o tempo disponível durante o período ótimo para a operação necessária deve ser conhecido. O tempo disponível varia consideravelmente de ano para ano de acordo com a variação das condições meteorológicas (ROTZ; HARRIGAN, 2005).

Ripoli et al. (2001) recomendam a abordagem do levantamento de custos pelo chamado “método do custo anualizado equivalente - CAE”, desenvolvido a partir do conceito de anuidade equivalente para cálculo do custo anual de máquinas. Este método mostra que todos os valores são variáveis uma vez que se fazem projetos para toda a vida da máquina, desde sua aquisição até o momento de descarte ou de sucateamento. Os autores mostraram também que os itens levados em consideração na construção do fluxo de caixa são: valor inicial e valor residual após o tempo de vida útil, juros, seguro, alojamento e administração, combustível, lubrificantes, filtros, comboios de manutenção e abastecimento, peças de reposição e serviços mecânicos e mão de obra do operador.

O conhecimento do número de dias trabalháveis em operações com máquinas agrícolas é importante para calcular o tempo disponível permitindo o planejamento em relação ao manejo da área (CASTRO NETO, 2001).

Observando-se as atividades agrícolas relacionadas à cultura da cana-de-açúcar, verifica-se que os dimensionamentos das frotas são baseados em critérios econômicos e logísticos, sem, contudo, se preocupar com os dias efetivos para as atividades de campo.

Para se dimensionar o número de frotas agrícolas necessárias à determinada atividade, bem como seu custo operacional ou mesmo dimensionar o tempo efetivo disponível para que esta mesma máquina execute determinada tarefa é importante conhecer o conteúdo de água no solo e a influência do clima sobre aquele solo de forma que, conhecendo estas condições, se possa ter a real magnitude de quantos dias efetivamente trabalháveis existem para determinada atividade agrícola.

Com base no exposto acima, o objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto do número de dias trabalháveis para operação de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, definido pelos critérios regionais e gerais, no investimento necessário em colhedoras e o custo operacional do sistema para as regiões de Araçatuba e Piracicaba, no estado de São Paulo.

6.2. Material e Métodos

Foi elaborado um modelo matemático em planilha eletrônica para o cálculo de variáveis empregadas no dimensionamento do número de colhedoras para determinada situação e do custo para colheita, tomando-se como base as propostas de Mialhe (1974), Milan (2004) e Santos (2011). Após a construção, verificação e validação desse modelo, que se deu por meio da comparação dos resultados com os obtidos por Rosa (2017), foram realizadas análises de cenários a partir do número de dias trabalháveis e das demais variáveis do sistema.

A definição de dia trabalhável foi feita conforme metodologia calibrada e validada com base em dados de interrupção da colheita de 30 usinas sucroenergéticas distribuídas em diferentes regiões do estado de São Paulo. Dados meteorológicos diários para uma série histórica de 32 anos (1983 a 2014) foram empregados na determinação do número de dias trabalháveis (NDT), considerando-se os critérios regionais e gerais com relação à capacidade de água disponível (CAD), a chuva (PREC) e o armazenamento relativo (ARM/CAD) (Tabela 6.1). Para tanto, foi elaborado o balanço hídrico sequencial (BHSeq) pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) para as CADs de 40 e 80 mm.

Tabela 6.1 – Capacidade de água disponível (CAD), precipitação (PREC), e armazenamento relativo de água no solo (ARM/CAD), para definição dos critérios regionais e gerais para determinação do número de dias trabalháveis (NDT) para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar nas regiões de Piracicaba e Araçatuba, SP

Município	Crítérios	CAD (mm)	PREC (mm)	ARM/CAD (%)
Piracicaba	Regionais	80	3	90
Araçatuba	Regionais	40	3	70
Piracicaba	Gerais	40	3	90
Araçatuba	Gerais	40	3	90

Assim sendo, para a região de Piracicaba, considerando-se a CAD de 80 mm, um dia foi considerado como trabalhável quando o ARM/CAD foi menor que 90% e a PREC do dia foi menor que 3 mm. A mesma análise foi feita para Araçatuba considerando CAD de 40 mm, ARM/CAD < 70% e PREC < 3 mm.

Além disso, também foram considerados os critérios gerais para a determinação do NDT para as duas localidades, ou seja, CAD de 40 mm, PREC < 3 mm e ARM/CAD < 90%.

Em se tratando de período de safra, para cada localidade considerada neste estudo foi estimado o NDT considerando-se uma safra padrão, iniciando no dia 1º de abril e terminando no dia 30 de novembro. Como variáveis da cultura considerou-se uma produtividade média do canavial de 85 t.ha⁻¹

Na elaboração do modelo matemático da operação de colheita considerou-se uma colhedora para colheita em plantio alternado, com espaçamento de 0,90 m x 1,50 m. (espaçamento médio de 1,2 m). A Figura 6.1 apresenta uma foto do modelo da colhedora cujos parâmetros foram considerados neste estudo.

Figura 6.1 – Colhedora de cana-de-açúcar cujas características foram utilizadas para condução deste estudo (Foto do autor)

A Tabela 6.2 apresenta as variáveis de entrada consideradas para a simulação dos resultados das eficiências, do custo, além de resultados analíticos, ou seja, resultados decorrentes das análises individuais de cada parâmetro que compõem as eficiências e os custos. Essas variáveis foram divididas em dois grupos, sendo um referente à administração e ao clima e outro associado à colhedora.

Os valores das variáveis contidos na Tabela 6.2 são referenciados pela ASABE (2006) e por consulta aos especialistas das usinas, como foi o caso da

eficiência gerencial estimada em 62,5%, com base na premissa de que uma colhedora deve trabalhar em média 15 horas por dia.

Tabela 6.2 – Dados de entrada para o dimensionamento do sistema de colheita da cana-de-açúcar para as regiões de Araçatuba e de Piracicaba, SP

Variável	Sigla	Unidade	Valor
Administração/clima			
Área	A	ha	50.000
Dias de safra	DS	dias	243
Número de domingos e feriados	NDF	dias	0
Dias úteis impróprios	NDUI	dias	Variável
Jornada de trabalho	JT	horas	24
Eficiência gerencial	EG	%	63%
Colhedora			
Valor inicial	VI	R\$	R\$ 980.000,00
Valor final	VF	%	20%
Valor final	VF	R\$	R\$ 196.000,00
Vida útil	VU	ano	5
Vida útil	VU	horas	14.000
Taxa de juros	i	%	10,5%
FAST ¹	FAST	%	1%
Consumo combustível	CCB	L h ⁻¹	40
Preço combustível	PR	R\$ L ⁻¹	2,35
Fat-rep-manut ²	FRM	%	100%
Velocidade de trabalho	VT	Km h ⁻¹	2
Nº linhas	NL	adm	2
Eficiência de campo	EC	%	60%
Perdas na colheita	PC	%	3%

¹ FAST: fator de custo anual de alojamento

² Fat-rep-manut: fator de reparos e manutenções

A seleção e dimensionamento de sistemas mecanizados se iniciam pela necessidade de adquirir máquinas mediante uma determinada demanda, seja ela para atender uma nova área agrícola, ou para a substituição parcial ou total da atual frota de equipamentos (MIALHE, 1974; MILAN, 2004). No presente trabalho, a demanda considerada (ritmo operacional) foi relativa à quantidade de área na qual se realizou a colheita. Relacionando esta quantidade com a capacidade de campo operacional, determinou-se o número de conjuntos necessários, conforme equação (6.1):

$$NC = \frac{RO}{CCO} \quad (6.1)$$

em que: NC é o número de colhedoras; RO é o ritmo operacional, em t dia⁻¹; e CCO é a capacidade de campo operacional, em t dia⁻¹.

A capacidade de campo operacional é expressa pela quantidade de trabalho realizada pela máquina em função do tempo disponível para a operação, conforme destaca Ripoli e Ripoli (2009), sendo que para sua determinação, foram relacionadas com a capacidade de campo teórica, eficiência de campo e eficiência gerencial, conforme equação (6.2), que descontam os tempos não trabalhados ao longo da operação, além da jornada de trabalho, de modo a parametrizar a unidade de tempo em questão:

$$CCO = CCT \times EC \times EG \times JT \quad (6.2)$$

em que: CCO é a capacidade de campo operacional, em t dia⁻¹; CCT é a capacidade de campo teórica, em t h⁻¹; EC é a eficiência de campo, em %; EG é a eficiência gerencial, em %; e JT é a jornada de trabalho, em h dia⁻¹.

A capacidade de campo teórica revela a máxima quantidade de trabalho que uma máquina consegue desenvolver em uma unidade de tempo (Ripoli e Ripoli, 2009), podendo ser calculada pela equação (6.3), que relaciona, basicamente, a largura da operação com a velocidade de deslocamento:

$$CCT = \frac{L \times V}{10} \quad (6.3)$$

em que: CCT é a capacidade de campo teórica, em ha h⁻¹; L é a largura de trabalho teórica da operação, em metros; e V é a velocidade de deslocamento, em km h⁻¹.

O desempenho econômico da colhedora foi avaliado no sentido de verificar o custo por hectare colhido ou custo operacional, determinado a partir da relação entre o custo horário do conjunto e a capacidade de trabalho da máquina, conforme equação (6.4):

$$CO = \frac{CHC}{CCO} \quad (6.4)$$

em que: CO é o custo operacional, em R\$ t⁻¹; CHC é o custo horário do conjunto, em R\$ h⁻¹; e CCO é a capacidade de campo operacional, em t h⁻¹.

O custo horário do conjunto é resultante da soma entre custo fixo e custo variável, conforme equação (6.5):

$$CHC = CFH + CVH \quad (6.5)$$

em que: CHC é o custo horário da colhedora, em R\$ h⁻¹; CFH é o custo fixo horário, em R\$ h⁻¹; e CVH é o custo variável horário, em R\$ h⁻¹.

O cálculo do custo fixo horário baseou-se na metodologia proposta pela *American Society of Agricultural and Biological Engineers* – ASABE (2011), conforme equação (6.6):

$$CFH = \frac{\left\{ VI \times \left[\left(\frac{1-VF}{VUA} \right) + \left[\left(\frac{1+VF}{2} \right) \times i \right] + AST \right\}}{NHTA} \quad (6.6)$$

em que: CFH é o custo fixo horário, em R\$ h⁻¹; VI é o valor inicial, em R\$; VF é o valor final, em decimal do valor inicial; VUA é a vida útil, em anos; i é a taxa de juros aplicada ao capital médio, em decimal; AST é o custo anual com alojamento, seguros e taxas, em decimal em relação ao valor inicial; e NHTA = Número de horas trabalhadas no ano.

Para o valor inicial da colhedora utilizou-se R\$ 980.000,00 (Tabela 6.2), apurado com o setor de suprimentos de empresas do setor. No valor final, considerou-se 20% em relação ao valor inicial da máquina, valor este apurado junto ao setor de inservíveis das mesmas empresas.

Para a vida útil em anos, pelo fato de depender, entre outros, da intensidade de utilização da máquina, utilizou-se a relação entre vida útil em horas (VUH) e número de horas trabalhadas por ano (NHTA), conforme equação (6.7). Para VUH foi utilizado o valor de 14.000 horas, enquanto que o NHTA foi determinado a partir

da relação entre a quantidade área a ser colhida (ritmo operacional), a capacidade de trabalho da colhedora e o número de colhedoras necessárias, conforme equação 6.8:

$$VUA = \frac{VUH}{NHTA} \quad (6.7)$$

em que: VUA é a vida útil, em anos; VUH é a vida útil, em horas; e NHTA é o número de horas trabalhadas no ano, em horas.

$$NHTA = \frac{\frac{DC}{CCO}}{NC} \quad (6.8)$$

em que: NHTA é o número de horas trabalhadas, em anos; DC é a demanda de cana na safra, em toneladas; CCO é a capacidade de campo operacional, em $t\ h^{-1}$; e NC é o número de colhedoras.

No caso da taxa de juros, o valor considerado foi de 10,5 % a.a. O mesmo foi apurado junto aos programas do Banco Nacional do Desenvolvimento – BNDES (2017) para fins de aquisição de máquinas agrícolas, o MODERFROTA (Programa de Modernização da Frota de Tratores Agrícolas, Implementos Associados e Colhedoras). Este programa sugere uma taxa de 8,5% ao ano (a.a.) para clientes com faturamento anual de até R\$ 90 milhões e 10,5% a.a. para clientes com faturamento anual acima deste valor. Como foi considerada uma usina com área de 50.000 ha entende-se que se trata de uma empresa com faturamento anual acima de R\$ 90 milhões.

Para alojamento, seguros e taxas, considerou-se 2% em relação ao valor inicial, conforme Santos (2011). O cálculo do custo variável horário, no caso de colhedoras, envolve basicamente os custos com combustível e reparos e manutenção, conforme equação (6.9):

$$CVH = CCB + CRM \quad (6.9)$$

em que: CVH é o custo variável horário, em $R\$ h^{-1}$; CCB é o custo com combustível, em $R\$ h^{-1}$; CRM é o custo com reparos e manutenção, em $R\$ h^{-1}$.

O cálculo do custo com combustível é realizado por meio da equação (6.10). A referência para o preço do combustível foi o diesel, cujo valor utilizado foi de 2,35 R\$ L⁻¹, abaixo do que se encontra em postos de combustíveis, no entanto, como o consumo de diesel é elevado há uma melhor negociação de preços fazendo com que este custo caia em relação aos postos. Para o consumo de combustível foi utilizado 45 L h⁻¹, sendo este um valor médio adotado pelas usinas para análises de novos investimentos nesta área.

$$CCB = PL \times CCH \quad (6.10)$$

em que: CCB é o custo com combustível, em R\$ h⁻¹; PL é o preço do combustível, em R\$ L⁻¹; e CCH é o consumo de combustível horário, em L h⁻¹.

Para o custo de reparos e manutenção (CRM) utilizou-se como base os dados de ASABE (2011), que relaciona o presente custo com o valor inicial e vida útil da máquina, conforme equação (6.11):

$$CRM = \frac{FRM \times VI}{VUH} \quad (6.11)$$

em que: CRM é o custo com reparos e manutenção, em R\$ h⁻¹; FRM é o fator de reparos e manutenção, em %; VI é o valor inicial, em R\$; e VUH é a vida útil, em horas.

Para determinação do FRM, utilizou-se a equação (6.12):

$$FRM = (4 \times 10^{-9} \times VUH^2) + (3 \times 10^{-5} \times VUH) \quad (6.12)$$

em que: FRM é o fator de reparos e manutenção, em %; VI é o valor inicial, em R\$; e VUH é a vida útil, em horas.

Após o cálculo de todas essas variáveis, foi elaborada uma tabela considerando-se as duas variáveis finais de interesse (número de máquinas e custo de produção) para os dois critérios para a determinação do NDT.

6.3. Resultados e Discussão

As Tabelas 6.3 e 6.4 apresentam os valores mensais do NDT para Araçatuba e Piracicaba, para os meses de safra (abril a novembro), considerando-se o cálculo do NDT pelos critérios regionais e gerais. Essas tabelas apresentam também os números médios, medianos, maiores e menores e o desvio padrão para os dias trabalháveis em função da região analisada, considerando-se as condições de simulação pelos critérios regionais (Tabela 6.3) e gerais (Tabela 6.4). Tais valores são importantes para se ter maior segurança na determinação dos dias disponíveis para a operação e seus extremos devem ser utilizados para avaliar os melhores e piores cenários para cada atividade.

Os números de dias trabalháveis para cada mês durante o período de safra foram utilizados no modelo de cálculo do sistema de colheita, o qual considerou o NDT de 192 dias para Araçatuba e 201 dias para Piracicaba pelos critérios regionais e de 210 dias para Araçatuba e 204 dias para Piracicaba pelos critérios gerais. Nota-se que há uma inversão no NDT pelos dois critérios, sendo que pelos critérios regionais Piracicaba possui mais NDT do que Araçatuba e pelos critérios gerais essa situação se inverte. Avaliando em termos climáticos o modelo geral parece fazer mais sentido uma vez que em Araçatuba há maior evapotranspiração se comparado à Piracicaba além do fato das chuvas possuírem, em média, menores volumes e serem concentradas de Novembro a Março, meses não considerados nesta análise.

Segundo Ricardo e Catalani (1990), o número real de dias trabalháveis no estado de São Paulo durante o verão é aproximadamente 50% menor do que no inverno, com uma interrupção média das atividades de 15% devido às condições climáticas.

No entanto, quando se trabalha com este tipo de abordagem agrometeorológica, as variáveis relativas ao solo ficam implícitas nas análises e, talvez, possam estar influenciando os resultados.

As Figuras 6.2 e 6.3 apresentam o número de dias trabalháveis mensais ao longo da safra de cada localidade analisada de modo a se ter uma melhor visualização da variação desses valores para cada um dos critérios utilizados.

Tabela 6.3 – Média, mediana, desvio padrão, maior ocorrência e menor ocorrência do número de dias trabalháveis (NDT) para as regiões de Araçatuba e de Piracicaba, SP, com base nos critérios regionais

Local	MÊS	Média	Mediana	Desv. Pad	Maior	Menor
Araçatuba	04	21	22	6,5	30	6
Araçatuba	05	23	24	5,2	31	12
Araçatuba	06	25	28	5,8	30	9
Araçatuba	07	29	30	2,2	31	22
Araçatuba	08	28	30	4,1	31	19
Araçatuba	09	24	25	4,7	30	12
Araçatuba	10	22	23	4,5	30	11
Araçatuba	11	20	20	4,0	28	13
Araçatuba Total		192	202	16,0	213	151
Piracicaba	04	23	25	4,9	29	12
Piracicaba	05	25	26	4,4	31	14
Piracicaba	06	25	27	5,3	30	10
Piracicaba	07	29	30	2,6	31	20
Piracicaba	08	29	30	2,9	31	19
Piracicaba	09	25	26	3,9	30	12
Piracicaba	10	24	24	3,6	30	17
Piracicaba	11	21	22	4,3	28	12
Piracicaba Total		201	210	13,0	220	155

Tabela 6.4 – Média, mediana, desvio padrão, maior ocorrência e menor ocorrência do número de dias trabalháveis (NDT) para as regiões de Araçatuba e Piracicaba, SP, com base nos critérios gerais (40-03-90)

Local	MÊS	Média	Mediana	Desv. Pad	Maior	Menor
Araçatuba	04	25	24	3,4	30	17
Araçatuba	05	26	27	3,0	31	18
Araçatuba	06	27	29	3,3	30	17
Araçatuba	07	29	30	1,5	31	25
Araçatuba	08	29	30	2,5	31	22
Araçatuba	09	25	25	3,2	30	16
Araçatuba	10	25	25	2,6	30	18
Araçatuba	11	24	24	2,5	28	18
Araçatuba Total		210	214	9,6	222	183
Piracicaba	04	24	25	3,8	29	15
Piracicaba	05	26	27	3,3	31	16
Piracicaba	06	26	27	3,7	30	17
Piracicaba	07	28	30	2,6	31	21
Piracicaba	08	29	30	2,8	31	21
Piracicaba	09	25	26	3,7	30	13
Piracicaba	10	24	24	2,9	29	20
Piracicaba	11	22	22	3,4	28	14
Piracicaba Total		204	211	9,9	219	169

Figura 6.2 – Média, mediana, maior ocorrência, menor ocorrência e desvio padrão do número de dias trabalháveis ao longo do ano para as regiões de Araçatuba (a) e Piracicaba (b), SP, considerando-se os critérios regionais para cada região

Figura 6.3 – Média, mediana, maior ocorrência, menor ocorrência e desvio padrão do número de dias trabalháveis ao longo do ano para as regiões de Araçatuba (a) e Piracicaba (b), SP, considerando-se os critérios gerais (40-03-90) para cada região

Analisando as Figuras 6.2 e 6.3 é possível observar que o número de dias aptos ao trabalho ao longo do ano obedece a uma curva que, em média, cresce a partir do mês de abril e volta a cair a partir de agosto em um comportamento próximo

a uma curva gaussiana e, portanto, a média dos dados pode representar bem o conjunto total de dados. Sendo assim, os cálculos realizados para se determinar o número de conjuntos necessários para a operação de colheita bem como os custos de investimento e operação envolvidos no sistema foram tomados com base nos valores médios de dias trabalháveis para cada região e para cada um dos critérios de determinação do NDT (regionais e gerais).

Ainda, avaliando-se as Figuras 6.2 e 6.3 nota-se que exceto quando se aplica os critérios regionais para Araçatuba, no mês de setembro há uma tendência de queda no NDT acompanhado de um aumento no mês posterior. Este fato pode ser explicado pelo início das chuvas em setembro quando ainda não se iniciou o verão e têm-se uma condição de chuvas com evapotranspirações ainda baixas e, portanto, há uma demora um pouco maior na secagem do solo impactando no NDT. Tulu et al. (1974), citados por Castro Neto (2001), comentam que a disponibilidade de dias trabalháveis é influenciada pelo clima e pelo tipo de solo e foi considerada como um dos fatores responsáveis pela alteração do custo de produção do milho entre o preparo do solo e o plantio.

Monteiro et al. (2014) afirmam que a variabilidade anual das chuvas e do armazenamento de água no solo permitiu identificar os períodos do ano com favorabilidades baixa, média e alta às operações com máquinas para o preparo e manejo do solo.

Pelas Figuras 6.2 e 6.3, ainda é possível observar que os critérios regionais resultaram em maior variabilidade entre o maior e o menor NDT, exceto para o inverno, momento no qual o menor NDT se aproxima do maior devido às características do clima tropical que possui duas estações bem definidas, ou seja, inverno seco e verão chuvoso.

Inserindo no modelo de simulação do sistema de colheita o NDT médio obtidos pelos dois critérios para as duas regiões avaliadas e considerando o restante dos dados de entrada do modelo iguais para as duas localidades, conforme a Tabela 6.2, foi possível chegar aos resultados apresentados na Tabela 6.5.

Como a Tabela 6,5 traz diversas variáveis como resultados do dimensionamento, na Tabela 6.6 são apresentados os principais indicadores para análise e discussão dos resultados.

Tabela 6.5 – Dimensionamento de sistemas mecanizados para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar para as regiões de Araçatuba e Piracicaba, SP, considerando-se o número de dias trabalháveis (NDT) definidos pelos critérios regionais e gerais (40-03-90)

Variável	Sigla	Unidade	Araçatuba		Piracicaba	
			Crítérios Regionais	Crítérios Gerais	Crítérios Regionais	Crítérios Gerais
Tempo disponível	TD	h	2880,0	3150,0	3015,0	3060,0
Ritmo operacional	RO	ha h ⁻¹	17,36	15,87	16,58	16,34
Cap. Campo Efet.	CCE	ha h ⁻¹	0,48	0,48	0,48	0,48
Cap. Campo Oper.	CCO	ha h ⁻¹	0,29	0,29	0,29	0,29
Cap. Produç. Oper.	CPO	t h ⁻¹	23,75	23,75	23,75	23,75
Perdas na colheita	PERD	t ha ⁻¹	2,55	2,55	2,55	2,55
Perdas na colheita	PERD	t	127500	127500	127500	127500
Cap. Produç. Oper.	CPO	t dia ⁻¹	569,89	569,89	569,89	569,89
Cap. Produç. Oper.	CPO	t h ⁻¹	23,75	23,75	23,75	23,75
Nº colhedoras	NCO	adim.	60,28	55,11	57,58	56,74
Nº colhedoras int.	NCOI	adim.	61	56	58	57
Horas colheita	NHTc	h	173611,1	173611,1	173611,1	173611,1
Horas colhedora	NHTcol	h	2846,1	3100,2	2993,3	3045,8
Vida útil prev.	VUP	anos	4,9	4,5	4,7	4,6
Área por máq.	APM	ha máq. ⁻¹	829,4	907,2	868,3	881,3
Depreciação Anual	DPA	R\$ ano ⁻¹	R\$ 159.380,69	R\$ 173.611,11	R\$ 167.624,52	R\$ 170.565,30
Juro Anual	JUA	R\$ ano ⁻¹	R\$ 61.740,00	R\$ 61.740,00	R\$ 61.740,00	R\$ 61.740,00
FAST	FAST	R\$ ano ⁻¹	R\$ 19.600,00	R\$ 19.600,00	R\$ 19.600,00	R\$ 19.600,00
Custo Fixo Anual	CFA	R\$ ano ⁻¹	R\$ 240.720,69	R\$ 254.951,11	R\$ 248.964,52	R\$ 251.905,30
Custo Fixo Horário	CFH	R\$ h ⁻¹	R\$ 84,58	R\$ 82,24	R\$ 83,17	R\$ 82,71
Custo Combustível	CCB	R\$ h ⁻¹	R\$ 105,75	R\$ 105,75	R\$ 105,75	R\$ 105,75
Custo rep. - manut.	CRM	R\$ h ⁻¹	R\$ 70,00	R\$ 70,00	R\$ 70,00	R\$ 70,00
Custo Variável	CVA	R\$ h ⁻¹	R\$ 175,75	R\$ 175,75	R\$ 175,75	R\$ 175,75
Custo horário máq.	CHM	R\$ h ⁻¹	R\$ 260,33	R\$ 257,99	R\$ 258,92	R\$ 258,46
Custo Operacional	COP	R\$ ha ⁻¹	R\$ 903,92	R\$ 895,79	R\$ 899,04	R\$ 897,42
Custo Prod.	CPROD	R\$ t ⁻¹	R\$ 10,96	R\$ 10,86	R\$ 10,90	R\$ 10,88
Total colhido	TCC	t	4.250.000	4.250.000	4.250.000	4.250.000
Custo Tot. Col.	CTC	R\$	R\$ 46.593.933	R\$ 46.174.655	R\$ 46.342.366	R\$ 46.258.510
Dist. Tot. Perc.	DPT	km	416.667	416.667	416.667	416.667
Dist. Tot. Perc./máq.	DPTmaq	km máq. ⁻¹	6.831	7.440	7.184	7.310
Gasto Comb. Safra	GCS	L	7.812.500	7.812.500	7.812.500	7.812.500
Gasto Comb. Safra/máq	GCSmaq	L máq. ⁻¹	128.074	139.509	134.698	137.061
Custo Comb. Safra/máq	CCSmaq	R\$ máq. ⁻¹	300.973	327.846	316.541	322.094
Área por Colh.	ACC	ha	820	893	862	877

Avaliando-se a Tabela 6.6 observa-se que a variação do NDT para as quatro situações expostas teve um impacto pouco significativo nos custos de produção em R\$ t⁻¹, sendo as diferenças de centavos entre os critérios adotados e até mesmo entre as regiões. Ripoli et al. (2001), trabalhando com o desempenho econômico de colhedora em cana sem queima, obtiveram resultados de 0,66 a 3,82 US\$ t⁻¹ de

cana colhida. Considerando a inflação desde o trabalho de Ripoli et al. (2001) até o momento e que a cotação do dólar atual está em R\$ 3,15, pode-se concluir que os resultados obtidos concordam com Ripoli et al. (2001). Já Kronka e Monteiro (1999) mostraram um custo operacional médio em cana sem queima de 2,09 US\$ t⁻¹, também similares aos obtidos neste estudo, desde que considerada a inflação acumulada nesse período.

Tabela 6.6 – Número de colhedoras, custo de produção, custo total de colheita, e investimento total em colhedoras, em função do número médio de dias trabalháveis para as regiões de Araçatuba e Piracicaba, SP, considerando-se os critérios regionais e gerais

ID	Descrição	Araçatuba		Piracicaba	
		Crítérios Regionais	Crítérios Gerais	Crítérios Regionais	Crítérios Gerais
1	Número médio de dias trabalháveis	192	210	201	204
2	Número de colhedoras	61	56	58	57
3	Custo de produção (R\$ t ⁻¹)	10,96	10,86	10,90	10,88
4	Custo Total de Colheita (R\$)	46.593.933	46.174.655	46.342.366	46.258.510
5	Investimento Total em Colhedoras (R\$)	59.780.000	54.880.000	56.840.000	55.860.000
6	SOMADE 4 + 5	106.373.933	101.054.655	103.182.366	102.118.510

Rodrigues e Saab (2007) avaliando a viabilidade técnica-econômica da utilização de colhedoras automotrizes de cana-de-açúcar sem queima em rebolos, comparando com o custo da colheita manual da cana queimada, de modo a fornecer subsídios que auxiliem no planejamento de investimentos agrícolas, encontraram valores de 3,06 US\$ t⁻¹ para o custo da colheita mecanizada da cana sem queima e de 4,14 US\$ t⁻¹ para a colheita manual da cana queimada.

Rosa (2017) desenvolvendo um modelo computacional para o dimensionamento operacional e econômico como ferramenta de apoio à tomada de decisão na colheita mecanizada da cana-de-açúcar sugeriu um custo de colheita variando de R\$ 10,96 t⁻¹ a R\$ 14,10 t⁻¹ em função da região do estado de São Paulo. Esses valores concordam com os valores obtidos nesse trabalho.

No custo total de colheita também não se observou grandes diferenças em relação à aplicação do modelo geral e do modelo individual para cada região bem como também não houve diferenças expressivas entre as regiões de forma que essas diferenças ficaram abaixo de 1%. O grande impacto das diferenças de NDT foi sobre o investimento (CAPEX – *Capital Expenditure*) total uma vez que para a região de Araçatuba a utilização dos critérios gerais superestimou o NDT o que subestimou o investimento necessário em 8,2% se comparado ao investimento com base no

critério regional tomando-se este como referência, uma vez que, de acordo com os resultados do capítulo 3, os critérios regionais obtiveram melhor desempenho em relação aos critérios gerais. Já para a região de Piracicaba pode-se considerar que ambos os critérios para determinação do NDT tiveram resultados similares causando pouco impacto, da ordem de 1,7%, no investimento total. Dessa forma recomenda-se que para a região de Araçatuba seja utilizado o critério regional para estimar o NDT, enquanto que para Piracicaba ambos os critérios podem ser utilizados.

Banchi et al. (2008a) realizaram um estudo com colhedoras em oito usinas de cana-de-açúcar no País e concluíram que, no chamado custo global, os custos fixos atingem 33%, os de reparo e manutenção 33%, o combustível 30% e o lubrificante 4%. No custo de reparo e manutenção, 16% são provenientes de mão-de-obra, 22% de terceiro e 62% de peças. Neste estudo, ao se avaliar a Tabela 6.5 e comparando o custo fixo horário e o custo total horário da máquina chega-se ao percentual de 32% de forma que o resultado é equivalente ao obtido Banchi et al. (2008a). Já os custos com reparos e manutenção (27%) e combustíveis (40%) possuem um percentual de participação nos custos globais acima dos encontrados por Banchi et al. (2008a). Rosa (2017) sugere (38%) para combustíveis e 31% para reparos e manutenção, resultados similares aos obtidos neste trabalho.

6.4. Conclusões

Com base nos resultados deste estudo foi possível concluir:

- A variação do NDT para as quatro situações expostas (dois locais, Araçatuba e Piracicaba, e dois critérios para determinação do NDT, regionais e gerais) teve um impacto pouco significativo nos custos de produção e totais;
- O maior impacto das diferenças de NDT foi sobre o investimento total uma vez que para a região de Araçatuba a utilização dos critérios gerais superestimou o NDT o que subestimou o investimento necessário em 8,2%. Já para a região de Piracicaba pode-se considerar que ambos os critérios para determinação do NDT tiveram resultados similares, causando pouco impacto no investimento total, da ordem de 1,7%;
- Para a região de Araçatuba deve-se empregar os critérios regionais para determinação do NDT e para Piracicaba ambos os critérios podem ser utilizados;

- A determinação correta do NDT é uma ferramenta fundamental para o dimensionamento de sistemas de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, sendo recomendável analisar a melhor metodologia para cada caso.

Referências

ASABE. Agricultural machinery management data ASAE D497.5. In: _____. ASABE standards. St. Joseph, 2006.

ASABE. Agricultural machinery management data ASAE D497.7. In: _____. ASABE standards. St. Joseph, 2011.

BANCHI, A. D.; LOPES, J. R.; SALES, F. Gestão de frotas custos com reparos e manutenção em colhedoras de cana-de-açúcar parte I. **Revista Agrimotor**. São Paulo, n. 30, p. 12-13, 2008a.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO (BNDES). **Moderfrota - Programa de Modernização da Frota de Tratores Agrícolas, Implementos Associados e Colhedoras**. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/moderfrota/>. Acesso em: 06/01/2017.

CANAL RURAL. **Colheita mecanizada de cana em SP atinge 91,3%, mostra Protocolo Agroambiental**. Disponível em: <http://www.canalrural.com.br/noticias/cana/colheita-mecanizada-cana-atinge-913-mostra-protocolo-agroambiental-61838> . Acesso em: 18/09/2016.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2001. 155p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar**. Brasília, v. 2, n.4, p.1-76, 2016.

DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2000. v.1, p.55-95.

KRONKA, P. F. B.; MONTEIRO, J. H. Desempenho operacional de colhedoras na Usina Iturama. In: **SEMANA DE CANA DE PIRACICABA**, v. 4., 1999, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Saccharum, p.46-48. 1999.

MIALHE, L.G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1974. 301p.

MILAN, M. **Gestão sistêmica e planejamento de máquinas agrícolas**. 2004. 100p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PIEDADE, S. M. S. Dias trabalháveis para o manejo do solo em função da chuva e da disponibilidade hídrica do solo em diferentes regiões brasileiras. **Revista Ambiente & Água**. v. 9, n. 3, 2014.

OLIVEIRA, M. P. **Dimensionamento operacional e econômico de um sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar: estudo de caso**. 2012. 81p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

PELOIA, P. R.; MILAN, M. Proposta de um sistema de medição de desempenho aplicado à mecanização agrícola. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.30, n.4, p.681-691, 2010.

RAMOS DA SILVA, J.E.A.; ALVES, M.R.P.A.; DA COSTA, M. A. B. Planejamento de turnos de trabalho: uma abordagem no setor sucroalcooleiro com uso de simulação discreta. **Gestão e Produção**. São Carlos, v. 18, n. 1, p. 73-90. 2011.

RICARDO, H. de S.; CATALANI, G. **Manual prático de escavação: terraplenagem e escavação de rocha**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1990. 656 p.

RIPOLI, T. C. C.; CARVALHO FILHO, S. M.; MOLINA JÚNIOR, W. F.; RIPOLI, M. L. C. Desempenho econômico de colhedora em cana crua. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 12, p. 1-5, 2001.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Edição dos autores. Piracicaba, 2009. 333p.

RODRIGUES, E. B.; SAAB, O. J. G. A. Avaliação técnico-econômica da colheita manual e mecanizada da cana-de-açúcar (*saccharum spp*) na região de Bandeirantes – Pr. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 4, p. 581-588, 2007.

ROSA, J. H. M. **Dimensionamento operacional e econômico da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): modelo computacional como ferramenta de apoio a tomadas de decisão**. 2017. 95p. Tese (Doutorado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

ROTZ, C. A.; HARRIGAN, T. M. Predicting suitable days for field machinery operations in a whole farm simulation. Applied Engineering in Agriculture. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 21, n. 4, 2005.

SANTOS, N.B. **Identificação dos fatores críticos da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2011. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S.P.; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, 2005.

SOUZA, Z.M.; BEUTLER, A.N.; PRADO, R.M.; BENTO, M.J.C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, v.34, n.1, p.31-38, 2006a.

TORO, A.; HANSSON, P. A. Analysis of field machinery performance based on daily soil workability status using discrete event simulation or on average workday probability. **Agricultural Systems**. v. 79, p.109–129. 2004.

ANEXOS

Anexo A. Probabilidades simples e condicionais de dias trabalháveis (T) e não trabalháveis (NT) e probabilidade da sequência de um (P(1)) a dez (P(10)) dias trabalháveis consecutivos, para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo para os municípios de (A.1) Ituverava, (A.2) Cardoso, (A.3) Araçatuba, (A.4) Potirendaba, (A.5) Pradópolis, (A.6) Dois Córregos, (A.7) Piracicaba, (A.8) Ipaussu, (A.9) Paraguaçu Paulista e (A.10) Andradina.

A.1 - Ituverava

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)							Probabilidades de dias consecutivos trabalháveis (%)									
	P(NT)	P(T)	P(NT/NT)	P(T/NT)	P(T/T)	P(NT/T)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)	
Jan	1	61	39	60	40	40	60	39	16	6	3	1	0	0	0	0	0
	2	48	52	49	51	59	41	52	31	18	11	6	4	2	1	1	0
	3	55	45	52	48	45	55	45	20	9	4	2	1	0	0	0	0
Fev	1	48	52	46	54	51	49	52	27	14	7	4	2	1	0	0	0
	2	47	53	52	48	49	51	53	26	13	6	3	2	1	0	0	0
	3	37	63	36	64	60	40	63	38	23	13	8	5	3	2	1	1
Mar	1	44	56	48	52	58	42	56	32	19	11	6	4	2	1	1	0
	2	40	60	45	55	61	39	60	36	22	13	8	5	3	2	1	1
	3	40	60	45	55	63	37	60	38	24	15	9	6	4	2	1	1
Abr	1	24	76	26	74	72	28	76	54	39	28	20	15	11	8	6	4
	2	24	76	30	70	74	26	76	56	41	30	22	16	12	9	6	5
	3	12	88	12	88	82	18	88	72	59	48	39	32	26	22	18	14
Mai	1	13	88	15	85	80	20	88	70	57	45	37	29	24	19	15	12
	2	11	89	11	89	80	20	89	71	57	45	36	29	23	18	15	12
	3	13	87	14	86	81	19	87	71	57	46	37	30	25	20	16	13
Jun	1	8	92	7	93	83	17	92	76	63	52	43	36	30	25	20	17
	2	3	97	3	97	87	13	97	84	73	64	55	48	42	37	32	28
	3	6	94	5	95	85	15	94	80	68	58	50	42	36	31	26	22
Jul	1	2	98	2	98	89	11	98	87	78	69	62	55	49	43	39	34
	2	5	95	3	97	86	14	95	82	70	60	52	45	38	33	28	24
	3	5	95	8	92	88	12	95	83	73	64	56	49	43	37	33	29
Ago	1	3	97	1	99	88	12	97	86	76	67	59	52	46	40	35	31
	2	5	95	5	95	86	14	95	82	71	61	52	45	39	34	29	25
	3	7	93	4	96	84	16	93	77	65	54	45	38	32	26	22	18
Set	1	13	87	13	87	81	19	87	70	56	45	37	30	24	19	15	12
	2	12	88	11	89	80	20	88	70	56	44	35	28	22	18	14	11
	3	19	81	19	81	75	25	81	61	45	34	25	19	14	11	8	6
Out	1	21	79	14	86	69	31	79	55	38	26	18	13	9	6	4	3
	2	23	77	21	79	72	28	77	56	41	29	21	15	11	8	6	4
	3	27	73	29	71	69	31	73	50	34	24	16	11	8	5	4	2
Nov	1	33	67	33	67	62	38	67	41	26	16	10	6	4	2	1	1
	2	39	61	38	62	59	41	61	36	21	13	8	4	3	2	1	1
	3	38	62	40	60	63	37	62	39	24	15	10	6	4	2	1	1
Dez	1	48	52	48	52	55	45	52	29	16	9	5	3	1	1	0	0
	2	60	40	65	35	45	55	40	18	8	4	2	1	0	0	0	0
	3	43	57	41	59	60	40	57	34	20	12	7	4	3	2	1	1
Média		26	74	26	74	70	30	74	54	41	32	25	20	16	14	11	9
DP		18	18	19	19	14	14	18	23	23	22	20	18	16	14	12	11

A.2 - Cardoso

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)							Probabilidades de dias consecutivos trabalháveis (%)									
	P(NT)	P(T)	P(NT/NT)	P(T/NT)	P(T/T)	P(NT/T)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)	
Jan	1	52	48	52	48	53	47	48	26	14	7	4	2	1	1	0	0
	2	45	55	49	51	54	46	55	30	16	9	5	3	1	1	0	0
	3	49	51	48	52	54	46	51	28	15	8	4	2	1	1	0	0
Fev	1	41	59	43	57	62	38	59	36	22	14	9	5	3	2	1	1
	2	42	58	40	60	52	48	58	30	16	8	4	2	1	1	0	0
	3	39	61	36	64	56	44	61	34	19	11	6	3	2	1	1	0
Mar	1	37	63	36	64	60	40	63	38	23	14	8	5	3	2	1	1
	2	37	63	43	57	62	38	63	39	24	15	9	6	3	2	1	1
	3	34	66	34	66	68	32	66	44	30	20	14	9	6	4	3	2
Abr	1	22	78	27	73	78	22	78	61	47	37	28	22	17	13	10	8
	2	23	78	22	78	72	28	78	56	40	29	21	15	11	8	6	4
	3	12	88	11	89	83	17	88	73	61	50	41	34	28	23	19	16
Mai	1	10	90	12	88	83	17	90	75	62	52	43	36	30	25	20	17
	2	10	90	6	94	79	21	90	71	56	45	35	28	22	18	14	11
	3	13	87	14	86	80	20	87	69	56	44	35	28	23	18	14	12
Jun	1	9	91	10	90	84	16	91	76	64	54	45	38	32	27	23	19
	2	4	96	3	97	86	14	96	82	71	61	52	45	38	33	28	24
	3	5	95	4	96	86	14	95	81	69	59	51	43	37	32	27	23
Jul	1	1	99	0	100	89	11	99	89	79	71	63	56	50	45	40	36
	2	3	98	4	96	89	11	98	87	77	69	61	54	48	43	38	34
	3	7	93	11	89	87	13	93	81	70	60	52	45	39	34	29	25
Ago	1	3	97	3	97	88	12	97	85	75	66	58	51	44	39	34	30
	2	4	96	4	96	87	13	96	83	72	63	54	47	41	35	31	27
	3	7	93	8	92	86	14	93	80	68	59	50	43	37	31	27	23
Set	1	13	87	12	88	79	21	87	69	54	43	34	27	21	17	13	10
	2	13	87	17	83	78	22	87	68	53	42	33	25	20	16	12	10
	3	18	83	16	84	77	23	83	63	49	37	29	22	17	13	10	8
Out	1	14	86	8	92	77	23	86	66	51	40	31	24	18	14	11	8
	2	16	84	14	86	75	25	84	63	47	36	27	20	15	11	8	6
	3	20	80	17	83	73	27	80	58	42	31	22	16	12	9	6	4
Nov	1	23	77	30	70	69	31	77	53	37	26	18	12	9	6	4	3
	2	30	70	28	72	64	36	70	45	29	19	12	8	5	3	2	1
	3	30	70	35	65	68	32	70	48	33	22	15	10	7	5	3	2
Dez	1	33	67	34	66	64	36	67	43	28	18	12	7	5	3	2	1
	2	47	53	47	53	49	51	53	26	13	6	3	1	1	0	0	0
	3	38	62	40	60	62	38	62	39	24	15	9	6	4	2	1	1
Média		22	78	23	77	73	27	78	58	45	35	28	22	18	15	12	10
DP		16	16	16	16	12	12	16	20	21	21	19	17	16	14	12	11

A.3 - Araçatuba

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)						Probabilidades de dias consecutivos trabalháveis (%)									
	P(NT)	P(T)	P(NT/NT)	P(T/NT)	P(T/T)	P(NT/T)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)
Jan	1	48	53	50	54	46	53	28	15	8	4	2	1	1	0	0
	2	41	59	48	52	62	38	59	36	22	14	9	5	3	2	1
	3	39	61	43	57	61	39	61	37	22	14	8	5	3	2	1
Fev	1	36	64	40	60	63	37	64	40	26	16	10	7	4	3	2
	2	37	63	30	70	58	42	63	36	21	12	7	4	2	1	0
	3	33	67	33	67	62	38	67	42	26	16	10	6	4	2	1
Mar	1	35	65	39	61	63	37	65	41	26	17	11	7	4	3	2
	2	30	70	36	64	68	32	70	48	33	22	15	10	7	5	3
	3	26	74	23	77	68	32	74	50	34	23	16	11	7	5	3
Abr	1	18	82	20	80	76	24	82	62	47	36	28	21	16	12	9
	2	20	80	27	73	79	21	80	63	50	39	31	25	19	15	12
	3	16	84	18	82	81	19	84	68	55	44	36	29	23	19	15
Mai	1	13	87	20	80	81	19	87	71	58	47	38	31	25	21	17
	2	13	88	10	90	79	21	88	69	54	43	34	27	21	16	13
	3	18	82	22	78	78	22	82	64	50	39	30	23	18	14	11
Jun	1	12	88	15	85	83	17	88	73	61	50	42	35	29	24	20
	2	8	92	7	93	83	17	92	76	64	53	44	37	31	25	21
	3	9	91	10	90	83	17	91	76	63	53	44	37	31	25	21
Jul	1	3	97	2	98	88	12	97	85	74	65	57	50	44	38	34
	2	6	94	5	95	86	14	94	81	69	60	51	44	38	33	28
	3	7	93	6	94	86	14	93	80	69	59	50	43	37	32	27
Ago	1	4	96	4	96	86	14	96	82	71	61	52	45	39	33	29
	2	5	95	7	93	87	13	95	83	72	63	54	47	41	36	31
	3	10	90	13	87	84	16	90	76	64	54	46	38	32	27	23
Set	1	16	84	16	84	77	23	84	65	49	38	29	22	17	13	10
	2	13	87	13	87	80	20	87	69	55	44	35	28	22	18	14
	3	20	80	22	78	76	24	80	60	46	34	26	20	15	11	9
Out	1	18	83	17	83	76	24	83	63	48	36	28	21	16	12	9
	2	17	83	15	85	75	25	83	62	46	35	26	19	14	11	8
	3	23	77	23	77	73	27	77	57	41	30	22	16	12	9	6
Nov	1	22	78	20	80	72	28	78	56	40	29	21	15	11	8	5
	2	23	77	25	75	72	28	77	55	40	29	21	15	11	8	6
	3	19	81	18	82	76	24	81	62	47	36	27	21	16	12	9
Dez	1	31	69	30	70	66	34	69	46	30	20	13	9	6	4	3
	2	37	63	41	59	58	42	63	37	22	13	7	4	3	1	1
	3	33	67	35	65	67	33	67	45	30	20	13	9	6	4	3
Média		21	79	22	78	74	26	79	60	46	35	28	22	17	14	11
DP		12	12	13	13	9	9	12	16	17	17	16	14	13	11	9

A.4 - Potirendaba

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)						Probabilidades de dias consecutivos trabalháveis (%)									
	P(NT)	P(T)	P(NT/NT)	P(T/NT)	P(T/T)	P(NT/T)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)
Jan	1	53	47	59	41	50	50	47	23	12	6	3	1	1	0	0
	2	45	55	43	57	49	51	55	27	13	6	3	2	1	0	0
	3	47	53	50	50	58	42	53	31	18	11	6	4	2	1	0
Fev	1	44	56	38	62	53	47	56	30	16	8	5	2	1	1	0
	2	47	53	51	49	55	45	53	29	16	9	5	3	1	1	0
	3	41	59	32	68	52	48	59	31	16	8	4	2	1	1	0
Mar	1	38	62	37	63	60	40	62	37	22	14	8	5	3	2	1
	2	35	65	37	63	67	33	65	43	29	19	13	9	6	4	3
	3	30	70	32	68	69	31	70	48	33	23	16	11	7	5	3
Abr	1	24	76	24	76	71	29	76	54	38	27	19	14	10	7	5
	2	20	80	24	76	76	24	80	61	46	35	27	21	16	12	9
	3	14	86	16	84	80	20	86	69	55	44	35	28	23	18	15
Mai	1	13	87	18	82	80	20	87	69	56	45	36	29	23	18	15
	2	13	87	16	84	79	21	87	69	55	44	35	27	22	17	14
	3	16	84	19	81	78	22	84	66	52	41	32	25	20	15	12
Jun	1	12	88	17	83	83	17	88	73	61	51	42	35	29	24	20
	2	6	94	5	95	86	14	94	80	69	59	50	43	37	32	27
	3	7	93	6	94	85	15	93	79	66	56	48	40	34	29	24
Jul	1	3	97	2	98	87	13	97	84	73	63	55	48	41	36	31
	2	6	94	4	96	85	15	94	80	68	57	49	41	35	30	25
	3	7	93	10	90	86	14	93	80	69	59	51	43	37	32	27
Ago	1	5	95	5	95	86	14	95	81	69	59	51	44	37	32	27
	2	5	95	6	94	87	13	95	83	73	63	55	48	42	37	32
	3	11	89	17	83	85	15	89	76	64	55	46	39	33	28	24
Set	1	15	85	17	83	79	21	85	67	53	42	33	26	20	16	12
	2	14	86	18	82	80	20	86	68	55	44	35	28	22	18	14
	3	19	81	15	85	74	26	81	60	45	34	25	19	14	10	8
Out	1	21	79	17	83	73	27	79	58	42	31	23	16	12	9	6
	2	21	79	21	79	72	28	79	57	41	29	21	15	11	8	6
	3	20	80	22	78	74	26	80	59	44	32	24	18	13	10	7
Nov	1	21	79	26	74	73	27	79	58	42	31	23	17	12	9	7
	2	28	73	25	75	65	35	73	47	30	20	13	8	5	3	2
	3	32	68	35	65	63	37	68	43	27	17	11	7	4	3	2
Dez	1	35	65	36	64	64	36	65	42	27	17	11	7	5	3	2
	2	48	52	54	46	58	42	52	30	18	10	6	4	2	1	1
	3	43	57	46	54	59	41	57	33	19	11	7	4	2	1	1
Média		24	76	25	75	72	28	76	56	43	33	26	20	16	13	11
DP		15	15	15	15	12	12	15	19	20	19	17	16	14	12	10

A.5 - Pradópolis

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)							Probabilidades de dias consecutivos trabalháveis (%)									
		P(NT)	P(T)	P(NT/NT)	P(T/NT)	P(T/T)	P(NT/T)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)
Jan	1	52	48	58	42	53	47	48	25	13	7	4	2	1	1	0	0
	2	47	53	46	54	56	44	53	30	17	9	5	3	2	1	1	0
	3	54	46	55	45	51	49	46	23	12	6	3	2	1	0	0	0
Fev	1	52	48	53	47	50	50	48	24	12	6	3	2	1	0	0	0
	2	48	52	47	53	49	51	52	25	12	6	3	1	1	0	0	0
	3	41	59	37	63	53	47	59	31	16	9	5	2	1	1	0	0
Mar	1	41	59	47	53	59	41	59	35	20	12	7	4	2	1	1	1
	2	34	66	39	61	70	30	66	46	32	22	15	11	7	5	4	3
	3	30	70	30	70	66	34	70	46	30	20	13	8	6	4	2	2
Abr	1	21	79	25	75	78	22	79	61	48	37	29	22	17	13	10	8
	2	19	81	26	74	76	24	81	61	46	35	26	20	15	11	9	7
	3	16	84	18	82	81	19	84	68	55	44	36	29	23	19	15	12
Mai	1	15	85	19	81	78	22	85	67	52	41	32	25	20	15	12	9
	2	15	85	14	86	77	23	85	66	51	40	31	24	18	14	11	9
	3	19	81	23	77	78	22	81	63	49	38	29	23	18	14	11	8
Jun	1	11	89	13	87	84	16	89	74	62	52	44	37	31	26	22	18
	2	7	93	7	93	85	15	93	80	68	58	49	42	36	30	26	22
	3	7	93	10	90	85	15	93	80	68	58	50	42	36	31	26	23
Jul	1	3	98	3	97	89	11	98	86	77	68	60	53	47	42	37	33
	2	5	95	4	96	87	13	95	83	72	62	54	47	41	35	31	27
	3	7	93	10	90	86	14	93	80	68	59	50	43	37	32	27	23
Ago	1	4	96	3	97	88	12	96	84	74	65	57	50	44	39	34	30
	2	4	96	6	94	88	12	96	84	75	66	58	51	45	40	35	31
	3	9	91	12	88	84	16	91	77	65	55	46	39	32	27	23	19
Set	1	11	89	10	90	80	20	89	71	57	45	36	29	23	19	15	12
	2	16	84	18	82	77	23	84	64	49	38	29	22	17	13	10	8
	3	17	83	20	80	79	21	83	65	51	40	32	25	20	15	12	9
Out	1	20	80	18	82	73	27	80	58	43	31	23	16	12	9	6	5
	2	25	75	28	72	69	31	75	52	36	25	17	12	8	6	4	3
	3	23	77	26	74	72	28	77	55	39	28	20	14	10	7	5	4
Nov	1	29	71	30	70	68	32	71	48	33	22	15	10	7	5	3	2
	2	35	65	39	61	62	38	65	40	25	15	9	6	4	2	1	1
	3	34	66	29	71	59	41	66	39	23	13	8	5	3	2	1	1
Dez	1	38	62	38	62	60	40	62	37	22	14	8	5	3	2	1	1
	2	50	50	54	46	52	48	50	26	13	7	4	2	1	0	0	0
	3	48	52	50	50	56	44	52	29	16	9	5	3	2	1	0	0
Média		25	75	27	73	71	29	75	55	42	32	25	20	16	13	11	9
DP		16	16	17	17	13	13	16	21	21	20	19	17	15	13	12	10

A.6 - Dois Córregos

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)						Probabilidades de dias consecutivos trabalháveis (%)									
	P(NT)	P(T)	P(NT/NT)	P(T/NT)	P(T/T)	P(NT/T)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)
Jan	1	51	49	52	48	51	49	49	25	13	7	3	2	1	0	0
	2	44	56	44	56	56	44	56	32	18	10	6	3	2	1	0
	3	51	49	54	46	56	44	49	28	15	9	5	3	1	1	0
Fev	1	48	53	45	55	51	49	53	27	14	7	4	2	1	0	0
	2	51	49	52	48	52	48	49	25	13	7	4	2	1	1	0
	3	44	56	40	60	55	45	56	31	17	9	5	3	2	1	0
Mar	1	39	61	44	56	60	40	61	37	22	13	8	5	3	2	1
	2	31	69	36	64	69	31	69	48	33	23	16	11	7	5	3
	3	28	72	29	71	69	31	72	50	34	24	17	11	8	5	4
Abr	1	19	81	20	80	77	23	81	62	48	37	28	22	17	13	10
	2	24	76	31	69	73	27	76	55	41	30	22	16	12	9	6
	3	18	82	19	81	77	23	82	63	48	37	29	22	17	13	10
Mai	1	16	84	29	71	80	20	84	68	55	44	35	28	23	18	15
	2	20	80	18	82	75	25	80	60	45	33	25	18	14	10	8
	3	24	76	32	68	75	25	76	57	42	31	23	18	13	10	7
Jun	1	16	84	23	77	80	20	84	68	54	44	35	28	23	18	15
	2	10	90	12	88	83	17	90	75	62	52	43	36	30	25	21
	3	12	88	14	86	82	18	88	73	60	50	41	34	28	23	19
Jul	1	5	95	4	96	85	15	95	81	69	59	51	43	37	31	27
	2	9	91	8	92	83	17	91	76	63	53	44	37	31	26	21
	3	11	89	16	84	85	15	89	75	64	54	46	38	33	27	23
Ago	1	6	94	6	94	85	15	94	80	68	58	49	41	35	30	25
	2	7	93	5	95	85	15	93	80	68	58	49	42	36	30	26
	3	11	89	14	86	85	15	89	76	64	54	46	39	33	28	24
Set	1	18	82	25	75	79	21	82	64	51	40	31	25	19	15	12
	2	17	83	19	81	78	22	83	65	51	40	31	24	19	15	12
	3	22	78	19	81	72	28	78	56	41	29	21	15	11	8	6
Out	1	19	81	19	81	76	24	81	61	46	35	26	20	15	11	9
	2	22	78	17	83	71	29	78	56	39	28	20	14	10	7	5
	3	23	77	21	79	71	29	77	55	39	28	20	14	10	7	5
Nov	1	26	74	30	70	72	28	74	54	39	28	20	15	11	8	6
	2	24	76	22	78	72	28	76	55	40	29	21	15	11	8	6
	3	30	70	32	68	64	36	70	45	29	19	12	8	5	3	2
Dez	1	33	68	35	65	64	36	68	43	27	17	11	7	4	3	2
	2	45	55	48	52	57	43	55	32	18	10	6	3	2	1	1
	3	43	57	44	56	54	46	57	31	17	9	5	3	1	1	0
Média	25	75	27	73	71	29	75	55	41	31	24	19	15	12	9	7
DP	14	14	14	14	11	11	14	18	18	17	15	13	12	10	9	7

A.7 - Piracicaba

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)						Probabilidades de dias consecutivos trabalháveis (%)									
	P(NT)	P(T)	P(NT/NT)	P(T/NT)	P(T/T)	P(NT/T)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)
Jan	1	48	53	54	46	58	42	53	30	18	10	6	3	2	1	0
	2	45	55	46	54	58	42	55	32	18	11	6	4	2	1	0
	3	47	53	51	49	57	43	53	30	17	10	5	3	2	1	0
Fev	1	38	62	38	62	60	40	62	37	22	13	8	5	3	2	1
	2	43	57	47	53	59	41	57	34	20	12	7	4	3	1	1
	3	34	66	32	68	62	38	66	41	25	15	10	6	4	2	1
Mar	1	37	63	38	62	65	35	63	41	27	17	11	7	5	3	2
	2	32	68	37	63	69	31	68	47	32	22	15	10	7	5	3
	3	30	70	38	62	69	31	70	48	33	23	16	11	8	5	4
Abr	1	22	78	27	73	77	23	78	60	46	35	27	20	16	12	9
	2	20	80	22	78	73	27	80	59	43	32	23	17	13	9	7
	3	18	83	18	82	77	23	83	64	49	38	29	23	17	13	10
Mai	1	14	86	14	86	78	22	86	67	52	40	31	24	19	15	11
	2	16	84	18	82	77	23	84	65	50	39	30	23	18	14	11
	3	21	79	27	73	75	25	79	59	44	33	24	18	14	10	8
Jun	1	16	84	18	82	80	20	84	67	53	43	34	27	22	17	14
	2	12	88	18	82	83	17	88	73	61	51	42	35	29	24	20
	3	12	88	15	85	82	18	88	72	59	48	39	32	26	21	18
Jul	1	4	96	5	95	87	13	96	83	73	64	56	48	42	37	32
	2	8	92	7	93	85	15	92	78	67	57	49	42	36	30	26
	3	11	89	14	86	83	17	89	74	62	51	43	36	30	25	21
Ago	1	6	94	5	95	87	13	94	82	71	62	54	46	40	35	30
	2	6	94	4	96	86	14	94	81	70	60	52	44	38	33	28
	3	11	89	13	87	83	17	89	74	61	51	42	35	29	24	20
Set	1	15	85	14	86	77	23	85	65	50	38	30	23	17	13	10
	2	17	83	18	82	77	23	83	64	49	37	29	22	17	13	10
	3	19	81	17	83	75	25	81	61	46	34	26	19	15	11	8
Out	1	20	80	18	82	73	27	80	58	43	31	23	17	12	9	6
	2	25	75	24	76	70	30	75	52	37	26	18	13	9	6	4
	3	21	79	23	77	74	26	79	58	43	31	23	17	13	9	7
Nov	1	22	78	21	79	70	30	78	55	38	26	18	13	9	6	4
	2	29	71	30	70	68	32	71	49	33	23	16	11	7	5	3
	3	31	69	31	69	64	36	69	44	28	18	11	7	5	3	2
Dez	1	31	69	30	70	66	34	69	46	30	20	13	9	6	4	3
	2	40	60	45	55	60	40	60	36	22	13	8	5	3	2	1
	3	39	61	40	60	60	40	61	37	22	13	8	5	3	2	1
Média		24	76	26	74	72	28	76	56	42	32	24	19	15	12	9
DP		12	12	14	14	9	9	12	16	17	16	15	13	12	10	8

A.8 - Ipaussu

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)						Probabilidades de dias consecutivos trabalháveis (%)									
	P(NT)	P(T)	P(NT/NT)	P(T/NT)	P(T/T)	P(NT/T)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)
Jan	1	51	49	53	47	49	51	49	24	12	6	3	1	1	0	0
	2	44	56	42	58	56	44	56	31	17	10	5	3	2	1	1
	3	46	54	48	52	56	44	54	30	17	9	5	3	2	1	1
Fev	1	42	58	38	62	58	42	58	34	19	11	7	4	2	1	1
	2	47	53	46	54	56	44	53	30	17	9	5	3	2	1	1
	3	31	69	24	76	61	39	69	42	26	16	10	6	4	2	1
Mar	1	36	64	35	65	60	40	64	38	23	14	8	5	3	2	1
	2	29	71	35	65	69	31	71	49	33	23	16	11	7	5	4
	3	31	69	38	62	71	29	69	49	35	25	18	13	9	6	5
Abr	1	19	81	19	81	77	23	81	62	48	37	28	22	17	13	10
	2	25	75	31	69	73	27	75	55	41	30	22	16	12	9	6
	3	20	80	28	72	75	25	80	59	44	33	25	18	14	10	8
Mai	1	20	80	27	73	77	23	80	62	48	37	28	22	17	13	10
	2	23	77	26	74	70	30	77	53	37	26	18	12	9	6	4
	3	26	74	35	65	74	26	74	55	41	31	23	17	13	9	7
Jun	1	21	79	24	76	77	23	79	61	47	36	28	21	16	13	10
	2	15	85	19	81	81	19	85	68	55	45	36	29	24	19	15
	3	20	80	23	77	77	23	80	62	48	37	28	22	17	13	10
Jul	1	11	89	12	88	83	17	89	74	62	51	43	36	30	25	20
	2	13	87	12	88	82	18	87	71	59	48	39	32	26	22	18
	3	15	85	20	80	81	19	85	68	55	44	36	29	23	19	15
Ago	1	8	92	10	90	83	17	92	76	64	53	44	37	31	25	21
	2	9	91	8	92	84	16	91	77	64	54	46	38	32	27	23
	3	12	88	12	88	83	17	88	72	60	49	41	34	28	23	19
Set	1	19	81	21	79	76	24	81	61	47	36	27	21	16	12	9
	2	21	79	28	72	74	26	79	59	43	32	24	18	13	10	7
	3	23	77	24	76	74	26	77	57	42	31	23	17	12	9	7
Out	1	22	78	20	80	71	29	78	55	39	28	19	14	10	7	5
	2	25	75	24	76	66	34	75	49	32	21	14	9	6	4	3
	3	25	75	25	75	69	31	75	51	35	24	17	11	8	5	4
Nov	1	21	79	26	74	75	25	79	59	44	33	25	18	14	10	8
	2	27	73	30	70	71	29	73	52	37	26	19	13	10	7	5
	3	29	71	30	70	67	33	71	48	32	22	15	10	7	4	3
Dez	1	35	65	34	66	59	41	65	38	22	13	8	5	3	2	1
	2	36	64	41	59	64	36	64	41	26	17	11	7	4	3	2
	3	37	63	42	58	67	33	63	42	28	19	12	8	6	4	2
Média	26	74	28	72	71	29	74	53	39	29	22	16	12	10	7	6
DP	11	11	11	11	9	9	11	14	14	14	12	11	9	8	7	6

A.9 - Paraguaçu Paulista

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)							Probabilidades de dias consecutivos trabalháveis (%)									
	P(NT)	P(T)	P(NT/NT)	P(T/NT)	P(T/T)	P(NT/T)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)	
Jan	1	43	58	42	58	55	45	58	31	17	9	5	3	2	1	0	0
	2	39	61	40	60	63	37	61	38	24	15	9	6	4	2	1	1
	3	41	59	43	57	60	40	59	36	22	13	8	5	3	2	1	1
Fev	1	40	60	37	63	55	45	60	33	18	10	5	3	2	1	0	0
	2	44	56	44	56	55	45	56	31	17	9	5	3	1	1	0	0
	3	29	71	28	72	66	34	71	47	31	21	14	9	6	4	3	2
Mar	1	31	69	31	69	65	35	69	45	30	19	13	8	5	4	2	2
	2	29	71	34	66	71	29	71	50	36	26	18	13	9	7	5	3
	3	25	75	26	74	74	26	75	55	41	30	22	16	12	9	6	5
Abr	1	21	79	23	77	76	24	79	60	46	35	27	21	16	12	9	7
	2	23	78	27	73	75	25	78	58	44	33	25	19	14	11	8	6
	3	17	83	21	79	79	21	83	66	52	41	32	26	20	16	13	10
Mai	1	16	84	17	83	79	21	84	67	53	42	33	26	21	17	13	10
	2	20	80	23	77	74	26	80	59	44	33	24	18	13	10	7	6
	3	24	76	35	65	77	23	76	58	45	34	26	20	15	12	9	7
Jun	1	18	83	17	83	79	21	83	65	51	40	32	25	20	15	12	10
	2	15	85	16	84	81	19	85	69	56	45	36	29	24	19	16	13
	3	15	85	18	82	80	20	85	68	54	43	34	27	22	17	14	11
Jul	1	6	94	4	96	86	14	94	81	70	61	53	45	39	34	29	25
	2	8	92	9	91	85	15	92	78	66	56	47	40	34	29	24	21
	3	10	90	16	84	83	17	90	75	62	52	43	36	30	25	21	17
Ago	1	6	94	4	96	85	15	94	80	67	57	49	41	35	30	25	21
	2	9	91	10	90	84	16	91	76	64	53	45	37	31	26	22	18
	3	11	89	16	84	84	16	89	75	63	53	44	37	31	26	22	19
Set	1	19	81	21	79	75	25	81	61	46	34	25	19	14	11	8	6
	2	16	84	20	80	78	22	84	65	51	40	31	24	19	15	11	9
	3	23	77	25	75	73	27	77	56	40	29	21	15	11	8	6	4
Out	1	18	82	19	81	77	23	82	63	49	38	29	23	18	14	11	8
	2	21	79	23	77	75	25	79	59	44	33	24	18	14	10	8	6
	3	20	80	22	78	75	25	80	60	45	34	26	19	15	11	8	6
Nov	1	22	78	26	74	75	25	78	59	44	33	25	18	14	10	8	6
	2	28	72	33	67	66	34	72	47	31	21	14	9	6	4	3	2
	3	24	76	23	77	72	28	76	55	39	28	20	15	10	7	5	4
Dez	1	24	76	21	79	70	30	76	53	37	26	18	13	9	6	4	3
	2	36	64	38	62	62	38	64	40	25	15	10	6	4	2	1	1
	3	30	70	34	66	70	30	70	49	34	24	17	12	8	6	4	3
Média	23	77	25	75	73	27	77	57	43	33	25	20	15	12	10	8	7
DP	10	10	10	10	9	9	10	14	15	14	13	12	10	9	8	7	7

A.10 - Andradina

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)							Probabilidades de dias consecutivos trabalháveis (%)									
	P(NT)	P(T)	P(NT/NT)	P(T/NT)	P(T/T)	P(NT/T)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)	
Jan	1	37	63	39	61	62	38	63	39	24	15	9	6	4	2	1	1
	2	41	59	42	58	58	42	59	34	20	12	7	4	2	1	1	0
	3	38	62	39	61	61	39	62	38	23	14	9	5	3	2	1	1
Fev	1	36	64	35	65	64	36	64	41	26	17	11	7	4	3	2	1
	2	35	65	31	69	60	40	65	39	23	14	8	5	3	2	1	1
	3	34	66	32	68	62	38	66	41	25	16	10	6	4	2	1	1
Mar	1	34	66	33	67	63	37	66	42	26	17	10	7	4	3	2	1
	2	33	67	37	63	69	31	67	46	32	22	15	10	7	5	3	2
	3	24	76	29	71	76	24	76	58	44	34	26	20	15	11	9	7
Abr	1	19	81	24	76	76	24	81	62	47	36	27	21	16	12	9	7
	2	22	78	28	72	75	25	78	59	44	34	25	19	14	11	8	6
	3	14	86	18	82	83	17	86	71	59	49	41	34	28	23	19	16
Mai	1	14	86	17	83	80	20	86	68	54	43	34	27	22	17	14	11
	2	14	86	11	89	79	21	86	67	53	42	33	26	20	16	12	10
	3	22	78	34	66	79	21	78	62	48	38	30	23	18	14	11	9
Jun	1	12	88	13	87	83	17	88	73	61	50	42	34	28	24	20	16
	2	7	93	4	96	83	17	93	78	65	54	45	38	32	26	22	18
	3	8	92	7	93	83	17	92	76	63	52	43	36	30	25	20	17
Jul	1	4	96	3	97	87	13	96	84	73	64	56	49	43	37	33	28
	2	6	94	7	93	86	14	94	80	69	59	51	44	37	32	27	24
	3	7	93	11	89	86	14	93	80	69	59	51	44	38	33	28	25
Ago	1	5	95	2	98	85	15	95	81	69	59	50	42	36	31	26	22
	2	4	96	5	95	87	13	96	83	72	62	54	46	40	35	30	26
	3	10	90	13	87	85	15	90	77	65	55	47	39	33	28	24	20
Set	1	17	83	17	83	78	22	83	65	50	39	30	24	18	14	11	9
	2	15	85	19	81	80	20	85	68	54	43	34	27	22	17	14	11
	3	19	81	17	83	75	25	81	61	46	35	26	20	15	11	8	6
Out	1	17	83	16	84	76	24	83	64	49	37	29	22	17	13	10	7
	2	17	83	14	86	75	25	83	63	47	35	27	20	15	11	9	6
	3	21	79	16	84	73	27	79	58	42	30	22	16	12	9	6	5
Nov	1	25	75	22	78	69	31	75	52	36	24	17	12	8	5	4	3
	2	24	76	28	72	71	29	76	54	38	27	19	14	10	7	5	3
	3	26	74	27	73	68	32	74	51	35	24	16	11	8	5	4	2
Dez	1	31	69	28	72	68	32	69	47	32	22	15	10	7	5	3	2
	2	34	66	33	67	63	37	66	41	26	16	10	6	4	3	2	1
	3	35	65	39	61	64	36	65	42	27	17	11	7	5	3	2	1
Média		21	79	22	78	74	26	79	60	45	35	27	22	17	14	11	9
DP		11	11	12	12	9	9	11	15	16	16	15	14	12	11	10	9