

5 Análise experimental

5.1. Culturas e respectivos ciclos fenológicos

Os ciclos e datas de plantio e colheita das principais culturas encontradas em uma área de estudo determinam as variações temporais da quantidade de área foliar, volume de fitomassa e cobertura do solo. O seu conhecimento fornece a base para o entendimento e a discussão dos comportamentos espectrais apresentados pelos talhões em determinado período do ano. Na região onde está a área de estudo, os ciclos das principais culturas anuais (cereais) estão, de modo geral, compreendidos entre Outubro e Abril, em cada ano agrícola.

5.1.1. Cana-de-açúcar

Em São Paulo, o cultivo da cana-de-açúcar (*CA*) (*Saccharum spp.*) segue basicamente dois ciclos: um de 12 meses (“cana-de-ano”) e outro de 18 meses (“cana-de-ano-e-meio”). A cana-de-ano-e-meio é plantada entre Janeiro e Março e a cana-de-ano, entre Outubro e Novembro. Importante é destacar que cada talhão de cana pode ser colhido por cerca de cinco ou seis ciclos agrícolas seguidos. Desta forma, a cana tem um ciclo denominado “semi-perene”, que é diferente dos ciclos das culturas de grãos, tanto pela sua duração, quanto pela sua dinâmica fenológica.

Para as áreas novas (onde há cana recém-plantada), a massa verde da cana de ano-e-meio começa a recobrir completamente a superfície a partir de Outubro, quando há maior calor e mais precipitação pluviométrica; por outro lado, para as áreas novas da cana-de-ano, em Abril ou Maio deverá ocorrer o recobrimento verde total da superfície, e depois, a fitomassa verde tende a continuar aumentando o seu índice de área foliar até próximo da colheita. Em cada ano, o período de colheita inicia-se em Abril e se estende até Novembro e, desta forma, em uma mesma data de imagem satelitária, será possível encontrar: palha de cana

colhida, cana recém-plantada, cana em desenvolvimento vegetativo, cana adulta e também solos expostos preparados para o plantio.

A figura 12 ilustra os ciclos fenológicos da cana de 12 meses e da cana de 18 meses.

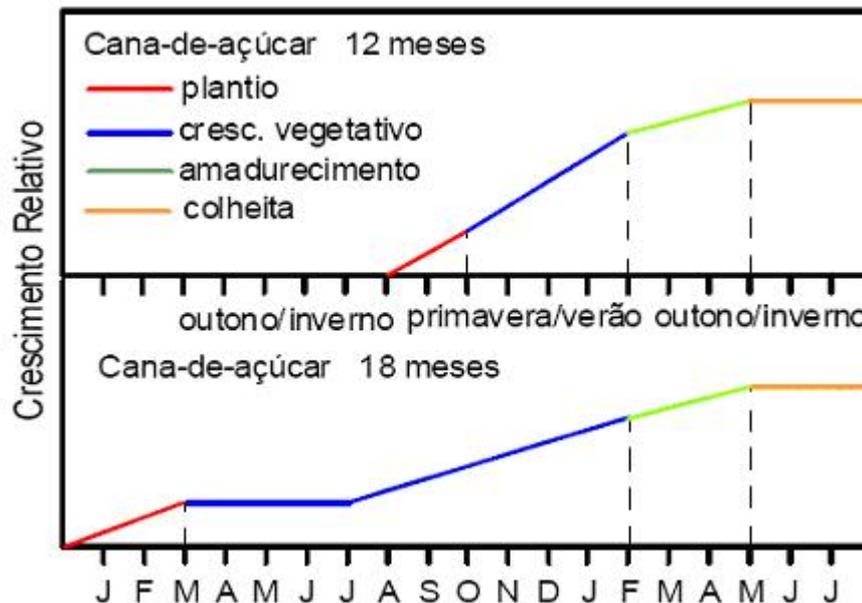


Figura 12 - Ciclos fenológicos da cana de açúcar de 12 meses (cana-de-ano) e 18 meses (cana-de-ano-e-meio). Figura obtida em (Gleriani, 2004).

5.1.2. Culturas de ciclo curto (cereais)

A soja (*SJ*) e o milho (*MI*) são culturas denominadas “anuais” ou “de ciclo curto”, uma vez que, em um período entre 110 e 140 dias, elas podem completar os seus respectivos ciclos fenológicos. São plantadas, em geral, no final de Outubro ou no início de Novembro. Germinam oito a dez dias após o plantio, iniciando então o seu desenvolvimento vegetativo, de modo a recobrir completamente a superfície cerca de sessenta dias após a germinação. Atingem um pico de fitomassa verde e, em seguida, iniciam o processo de enchimento dos grãos, quando começam a diminuir as folhas verdes, aumentando as folhas amareladas, que chegam a secar e a cair, passando então a expor novamente os solos de fundo até a colheita. A figura 13 ilustra o ciclo fenológico do milho, e a figura 14, o da soja.

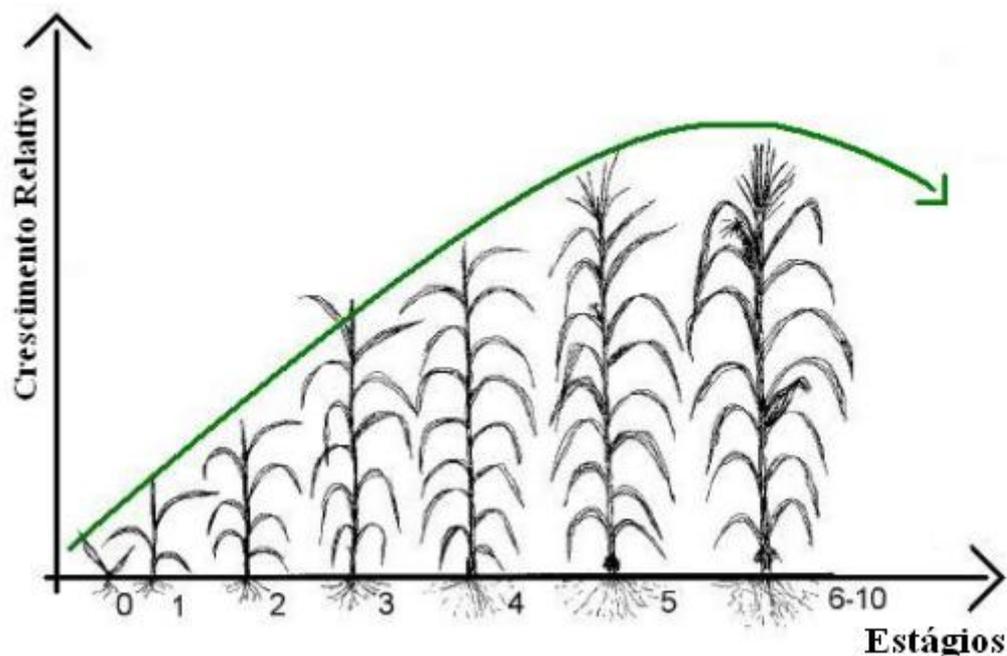


Figura 13 - Ciclo fenológico da cultura de milho. Figura adaptada de (Gleriani, 2004).

Na figura 13, a linha verde ilustra o perfil espectro-temporal do milho.

Segundo (Gleriani, 2004), o estágio 0 ocorre 4 a 5 dias após o plantio do milho e é quando há início de emergência. No estágio 1 (aproximadamente 15 dias após a emergência), fica visível o colar da quarta folha. No estágio seguinte, perto de 30 dias após a emergência, fica visível o colar da oitava folha. Já 40 dias depois da emergência, inicia-se o estágio 3, onde ocorre um aumento quase linear de massa seca e fica visível o colar da décima segunda folha. O estágio 4 ocorre de 55 a 58 dias após a emergência, e é nele que fica visível o colar da décima sexta folha. O estágio seguinte ocorre aproximadamente 65 dias após a emergência e é nele que aparecem as primeiras bonecas (espigas) entre a décima segunda e décima quarta folhas. O estágio 6 ocorre doze dias após 75% das plantas estarem embonecadas, e é nesse período que as espigas estão com o tamanho próximo do máximo. Inicia-se aqui a formação dos grãos. Doze dias após o estágio anterior, começa o estágio 7. Nesta fase, acontece um rápido desenvolvimento dos grãos. No estágio 8, doze dias após o estágio 7, aproximadamente 25% das plantas possuem grãos com dente. O estágio 9 inicia-se doze dias após a fase 8, e é nele que a taxa de acúmulo de matéria seca pela planta começa a diminuir e todos os grãos estão dentados. O estágio 10 ocorre doze dias após o estágio 9, e é quando há plantas com folhas senescentes e alta

perda de umidade. Após o estágio 10, inicia-se a senescência, quando as folhas secam e caem e então a resposta espectral começa a diminuir.

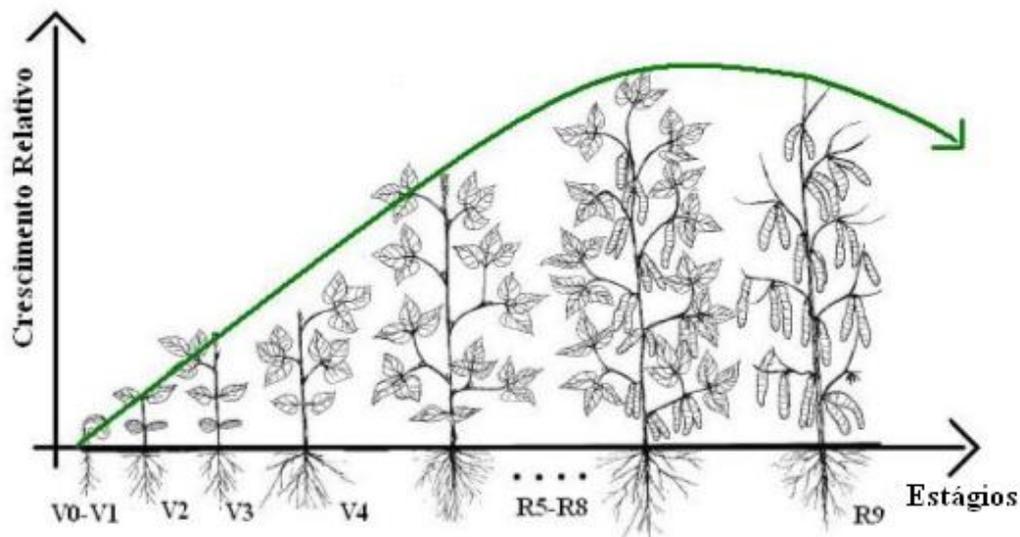


Figura 14 - Ciclo fenológico da cultura de soja. Figura adaptada de (Gleriani, 2004).

Na figura 14, a linha verde ilustra o perfil espectro-temporal da soja.

Segundo (Gleriani, 2004), a germinação (V0) ocorre de 4 a 5 dias após a sementeira. Já a emergência (V1) inicia-se quando os cotilédones aparecem em pelo menos 50% das plantas. O estágio das folhas primárias (V2) começa quando as folhas primárias de 50% das plantas estão desenvolvidas. A etapa da primeira folha trifoliada (V3) começa quando 50% das plantas estão com a folha trifoliada aberta. Por sua vez, o estágio da terceira folha trifoliada (V4) inicia-se quando 50% das plantas estão com 50% das terceiras folhas trifoliadas abertas. A pré-floração (R5) é o primeiro estágio reprodutivo da cultura. Considera-se o ingresso neste estágio quando 50% das plantas apresentam o primeiro botão floral. A floração (R6) ocorre quando 50% das plantas apresentam a primeira flor e a formação das vagens (R7) tem início quando 50% das plantas apresentam a primeira vagem. O estágio de enchimento de vagens (R8) inicia-se quando 50% das plantas começam a ter enchimento de grãos. No final desta fase a cor dos grãos deixa de ser verde e adquire a cor característica da variedade, e se inicia o desfolhamento das plantas. A maturação (R9), por sua vez, ocorre quando metade da população apresenta a primeira vagem descolorida e seca.

5.1.3. Pastagem

As pastagens (*PS*) apresentam uma dinâmica fenológica e espectral distinta em relação à dinâmica das culturas agrícolas citadas acima. Muitas vezes a dinâmica fenológico-espectral das pastagens depende dos tipos de manejos utilizados pelos pecuaristas, porém, em geral, as pastagens apresentam-se mais secas e ralas entre abril e setembro, quando, com a chegada da época chuvosa, iniciam seu revigoramento, com aumento do índice de área foliar, permanecendo então com vigor vegetativo verde entre novembro e março.

5.1.4. Outras coberturas vegetais

Além das coberturas vegetais mencionadas anteriormente, a mata-galeria (GA) também foi considerada neste trabalho. Esta, também conhecida como mata ciliar, é uma variante de cerrado, porém composta por vegetação mais frondosa. Ocupa áreas de vales úmidos ao longo de cursos de água, em solos aluvionados por conta da erosão.

Outras classes de cobertura de solo estão presentes na área de estudo: áreas urbanas, ruas, florestas e corpos d'água. Estas aparecem poucas vezes e praticamente não sofrem mudanças ao longo da seqüência de imagens, e por isso, não foram tratadas neste trabalho.

5.2. Área geográfica

A área de estudo correspondeu a três municípios localizados ao norte do estado de São Paulo: Ipuã, Guará e São Joaquim da Barra (dentro de um retângulo definido pelas seguintes coordenadas: 20°16'30"S até 20°40'00"S x 47°37'36"W até 48°13'50"W), somando uma área de 124.100 ha (Figura 15). Trata-se de uma região essencialmente agrícola, muito representativa da agricultura praticada em grande parte das regiões sul e sudeste brasileiras, tendo como cultivos principais a cana-de-açúcar, a soja e o milho. Esta área apresenta relevos planos a suavemente ondulados, clima tropical com inverno seco, com temperatura média anual de 22,9°C e precipitação média anual de 1480 mm.

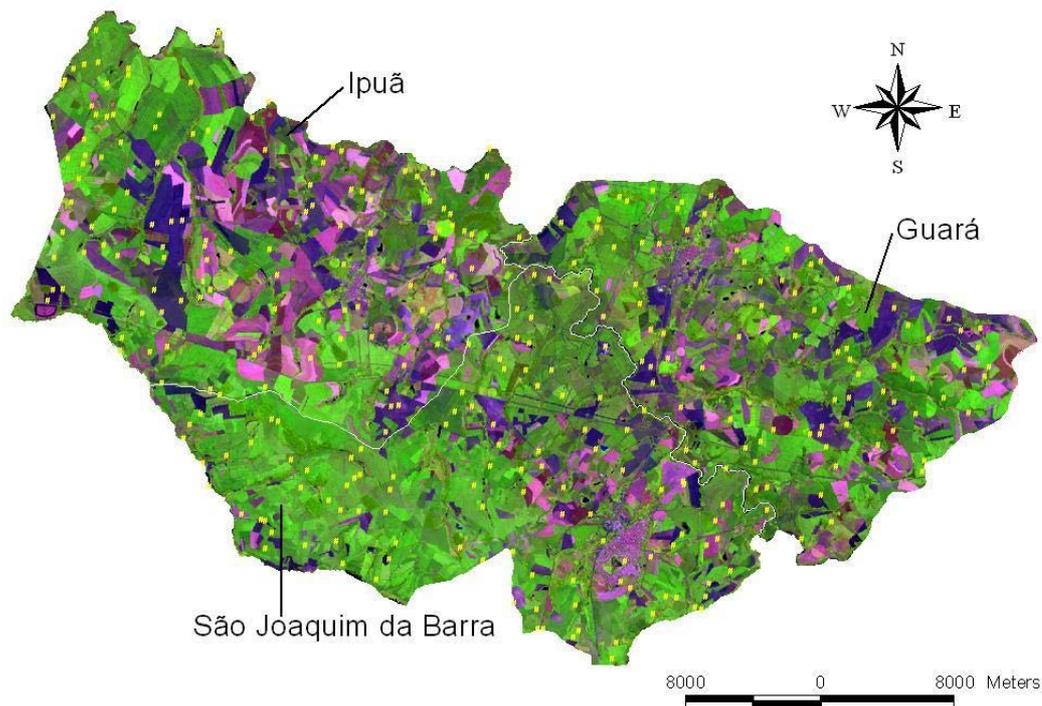


Figura 15 - Área de estudo, estado de São Paulo, Brasil. Os pontos amarelos correspondem a 316 pontos amostrais de referência.

Tabela 1 - Imagens disponíveis no conjunto de dados utilizado no presente trabalho.

| | 2002 | 2003 | 2004 |
|------------------|----------------------------------|---|--------------------------------|
| Janeiro | | (ETM+) 08/01/03 | (TM) 19/01/04 |
| Fevereiro | | (ETM+) 09/02/03 - 25/02/03 | |
| Abril | | (ETM+) 14/04/03 - 30/04/03 | |
| Maiο | | (ETM+) 16/05/03 | |
| Julho | | (TM) 27/07/03 | |
| Agosto | | (TM) 12/08/03 | |
| Setembro | (ETM+) 02/09/02 | | |
| Outubro | (ETM+) 20/10/02 | (TM) 15/10/03 | |

5.3. Imagens

A base de dados contém um total de 12 imagens do satélite Landsat, órbita/ponto WRS 220/74, de 2002 a 2004 (Tabela 1), tanto do sensor TM/Landsat-5, como do ETM+/Landsat-7 (Sanches, 2004). As bandas espectrais destes sensores, cuja resolução espacial é de 30m, têm as seguintes denominações e larguras: Banda 1 (450-520 nm); Banda 2 (530-610 nm); Banda 3 (630-690 nm); Banda 4 (780-900 nm); Banda 5 (1550-1750 nm); Banda 7 (2090-2350nm), sendo que a banda termal não foi utilizada. Descrições detalhadas sobre os sensores TM e ETM+/Landsat podem ser encontradas em (Lillesand & Kiefer, 1994).

5.4. Pré-processamento das imagens

As imagens Landsat estavam no formato Geotiff e, para o georeferenciamento, foram utilizados treze pontos de controle obtidos com GPS em campo. O método de reamostragem aplicado foi o do vizinho mais próximo, por ser o que melhor preserva a radiometria da imagem original (Mather, 1993; Richards, 1995).

Foi feita uma correção para minimizar efeitos atmosféricos presentes nas imagens multitemporais, uma vez que a atmosfera, pelos fenômenos de espalhamento, absorção e refração da energia eletromagnética, afeta a radiância efetivamente medida pelos sensores orbitais. A técnica utilizada foi a de *Subtração do Pixel Escuro*, também conhecida como *Dark-object subtraction technique*, desenvolvida por (Chavez, 1988).

Como um mesmo objeto pode apresentar distintos valores digitais em imagens de diferentes datas de aquisição, em função de diferenças dos ângulos solares e do espalhamento atmosférico, conjuntos multitemporais de imagens precisam ser uniformizados radiométricamente. Assim, no presente trabalho, esta uniformização foi feita segundo metodologia proposta por (Gürtler, 2003).

Por outro lado, como os algoritmos de classificação tomam por base o comportamento espectral dos objetos a serem classificados em imagens de diferentes datas, os valores de níveis de cinza foram convertidos para valores de reflectância, que são valores com significado físico e, assim, representam

corretamente os diferentes objetos e as condições em que se encontravam no momento da aquisição de cada imagem. Esta transformação para reflectância foi feita segundo metodologia proposta por (Luiz et al., 2003).

É importante mencionar que a etapa de pré-processamento das imagens não foi executada no presente trabalho e sim em (Sanches, 2004), onde uma descrição mais detalhada desta etapa pode ser encontrada.

5.5. Dados de referência

5.5.1. Segmentação

Nesta seção acrescentam-se detalhes à descrição já apresentada na seção sobre o algoritmo de segmentação na Seção 4.2.3. As 12 imagens disponíveis para este trabalho foram “empilhadas” e segmentadas utilizando-se o método de *watershed*, conforme detalhado em (Mota et al., 2007). Este método foi escolhido por ser muito rápido.

Todos os algoritmos de segmentação envolvem ajuste de parâmetros para que objetos significativos, para uma determinada aplicação, sejam obtidos. Esta tarefa é geralmente executada por um foto intérprete, assim como neste trabalho, o qual sabe o que esperar do resultado da segmentação e, sendo assim, adapta os parâmetros do algoritmo selecionado à aplicação. Por esta razão, é de se esperar que a escolha do algoritmo de segmentação não afete significativamente o resultado final. Um algoritmo do tipo crescimento de região poderia ter sido usado nesta etapa, por exemplo.

Os valores dos parâmetros da segmentação foram escolhidos depois de um trabalho de tentativa e erro, até que o resultado fosse visualmente consistente, considerando todas as imagens no banco de dados.

5.5.2. Processo de classificação visual

As coberturas vegetais consideradas neste estudo são as principais encontradas na área de estudo: cana-de-açúcar, soja, milho, pastagem e mata-galeria. Para as culturas de soja, milho e cana, o ciclo fenológico foi subdividido

em quatro fases: pré-plantio (época em que as superfícies aparecem como solos expostos nas imagens orbitais; sigla PP), crescimento (época em que as plantas recobrem completamente a superfície; sigla CR), adulta (época em que as plantas já se encontram em pleno vigor verde e podendo estar em início de senescimento; sigla AD), pós-colheita (época em que as áreas em que antes havia uma cultura agrícola, na imagem apresentam respostas espectrais típicas de palhaça seca remanescente da colheita; sigla PA).

As áreas de pastagem e mata-galeria apresentam uma dinâmica fenológico-espectral típica e são representadas por um único estado (AD).

Foram observados 316 pontos amostrais distribuídos pela área de estudo, estando representados em amarelo na figura 15. Esses pontos se situavam em segmentos distintos, tendo estes sido delimitados na etapa de segmentação. Cada um desses segmentos foi classificado, indicando seu tipo de cobertura vegetal e respectivo estágio fenológico, considerando cada data de passagem TM ou ETM+, segundo as classes acima indicadas por dois fotointérpretes experientes, tomando por base dois trabalhos de campo realizados (um em março e outro em agosto de 2003).

Primeiramente, os dois especialistas trabalharam independentemente e cada um interpretou todos os 316 segmentos de referência. Em seguida, foi feito um trabalho em conjunto de comparação de resultados a fim de gerar um resultado único para a classificação. Quando havia alguma discordância entre os dois, ambos os especialistas consideravam novamente a seqüência multitemporal de imagens e, assim, determinavam a classificação de consenso. Os segmentos foram então usados para construir os conjuntos de treinamento e teste. Cada segmento obtido foi dividido meio a meio, cada parte contendo aproximadamente a mesma quantidade de pixels. Uma parte foi usada para treinamento e a outra para teste.

As figuras 16, 17 e 18 mostram as culturas de milho, cana de açúcar e soja em diferentes estágios de crescimento. Nelas estão recortes de imagens Landsat na composição RGB 453 e fotos digitais obtidas durante o trabalho de campo, além da indicação dos respectivos estágios fenológicos. Estas figuras foram obtidas em (Sanches, 2004), e neste trabalho podem ser encontradas informações adicionais sobre o trabalho de campo.

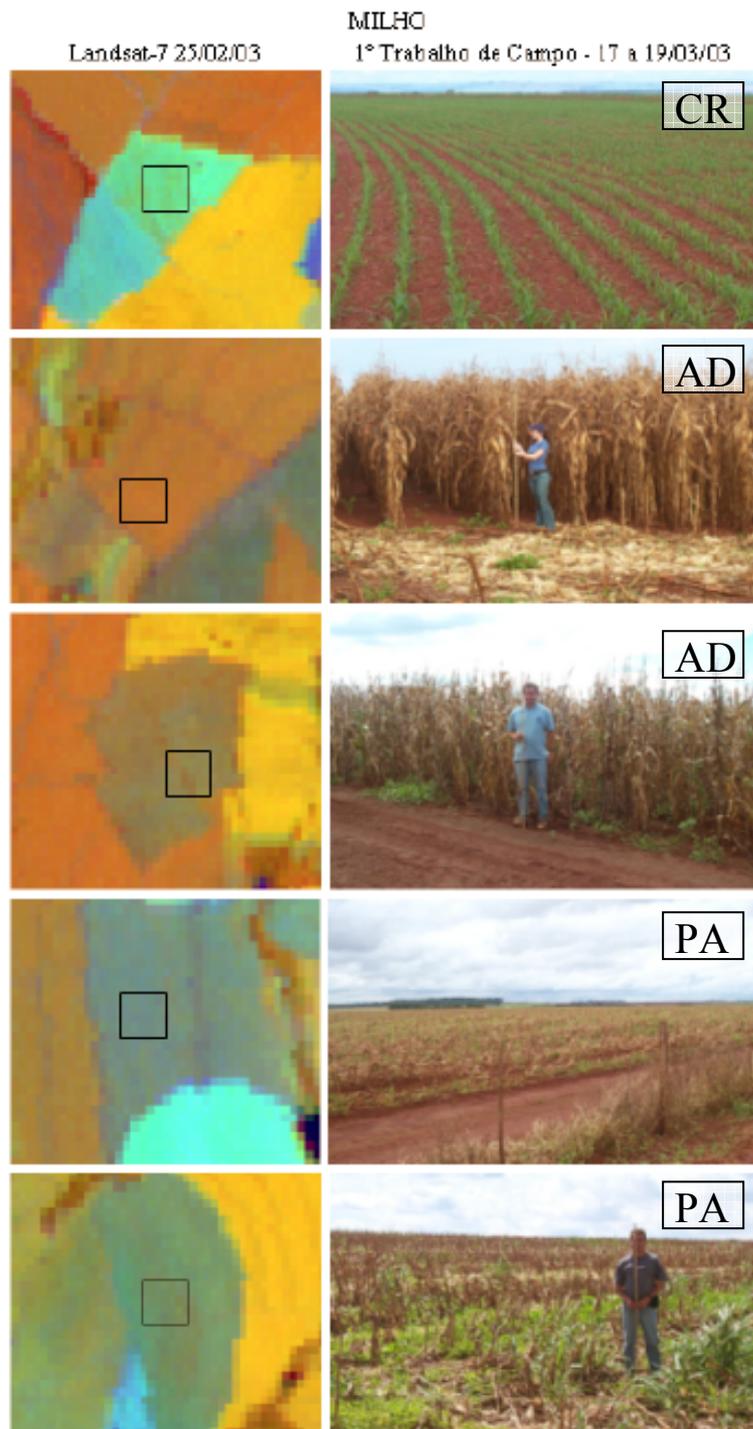


Figura 16 - Recorte de imagem Landsat na composição colorida RGB 453, e foto digital de campo de talhões de milho em diferentes estágios de crescimento. FONTE: (Sanches, 2004).

CANA-DE-AÇÚCAR

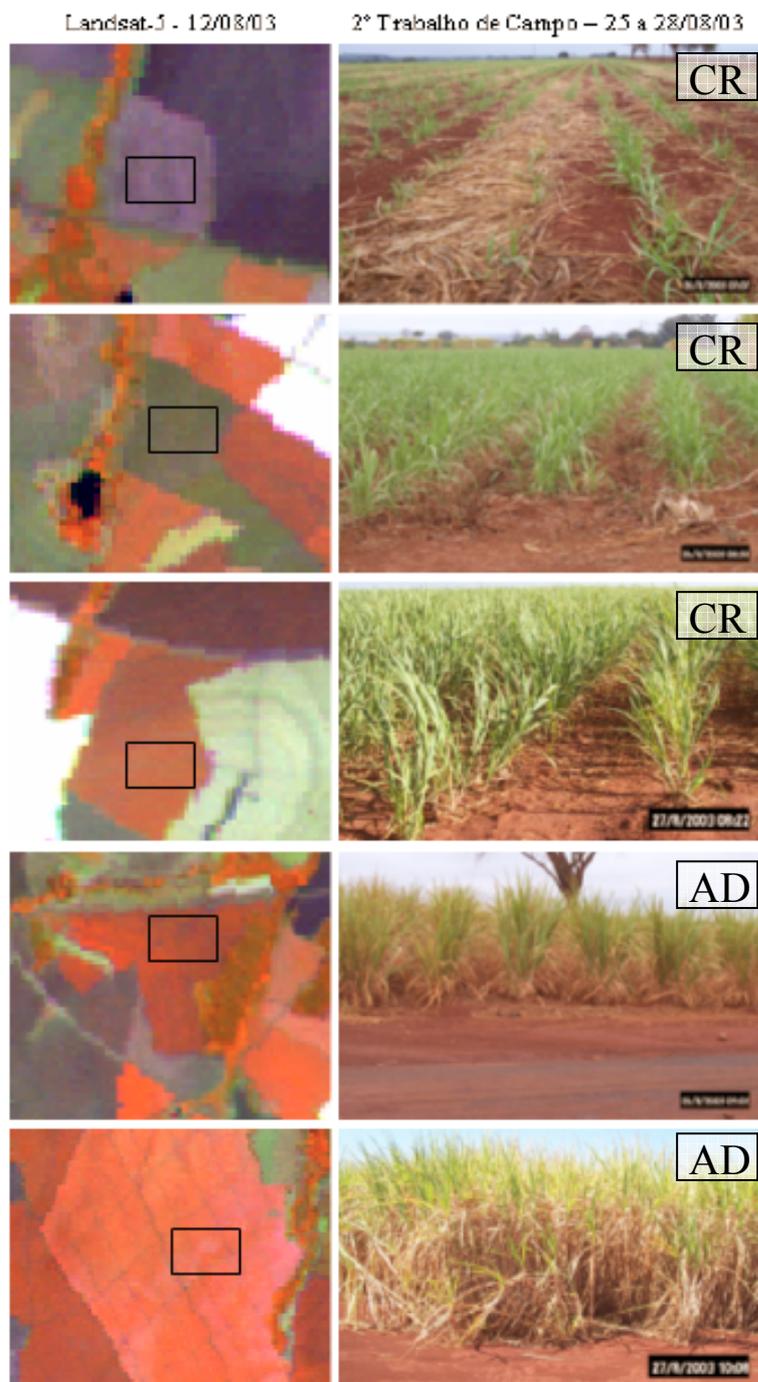


Figura 17 - Recorte de imagem Landsat na composição colorida RGB 453, e foto digital de campo de talhões de cana-de-açúcar em diferentes estágios de crescimento. FONTE: (Sanches, 2004).

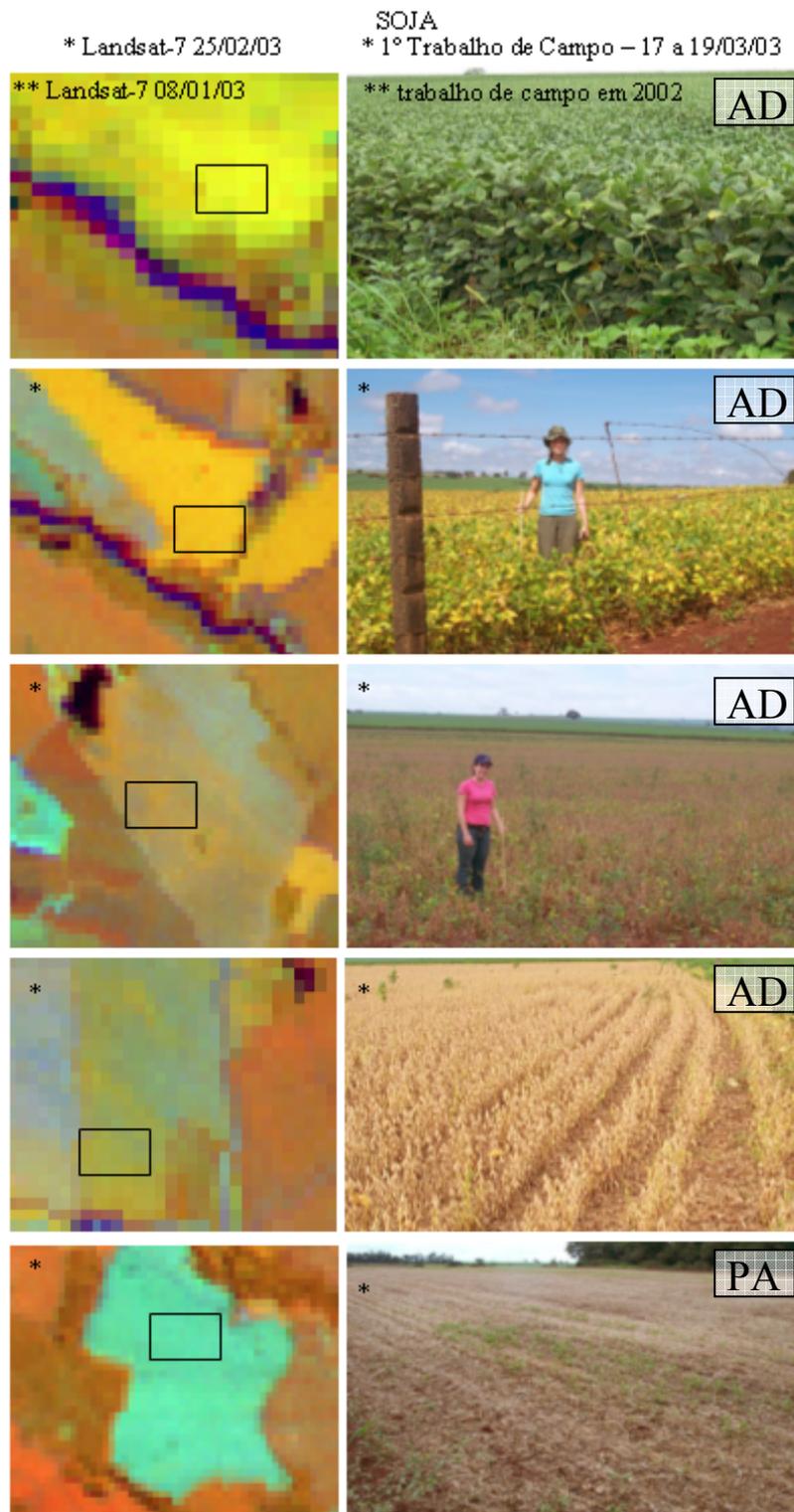


Figura 18 - Recorte de imagem Landsat na composição colorida RGB 453, e foto digital de campo de talhões de soja em diferentes estágios de crescimento. FONTE: (Sanches, 2004).

5.6. Experimentos

Neste trabalho foram executados seis experimentos para avaliar o potencial dos HMMs para a identificação de tipos de culturas agrícolas (e estágios fenológicos):

- Experimento 1: Conjunto ótimo de atributos espectrais.
- Experimento 2: Desempenho do método para identificar as culturas agrícolas.
- Experimento 3: Desempenho do método para identificar os estágios fenológicos.
- Experimento 4: Avaliação da influência do comprimento das seqüências sendo utilizadas no desempenho do método.
- Experimento 5: Determinação de quais estágios fenológicos melhor caracterizam cada cultura.
- Experimento 6: Comparação do método multitemporal baseado em HMMs com uma abordagem monotemporal de máxima verossimilhança.

Estes experimentos estão apresentados nas seções subseqüentes.

5.6.1. Experimento 1: Conjunto ótimo de atributos espectrais

Para os experimentos existia um total de sete atributos (seis bandas espectrais e NDVI) para a classificação do método baseado em HMMs. Um primeiro experimento foi conduzido para determinar o conjunto de n atributos que resultam no melhor desempenho da classificação para n variando de 1 a 7.

Os grupos de treinamento e teste foram divididos de acordo com o que foi mencionado no final da Seção 5.5.2.

O conjunto ótimo foi determinado através de uma busca exaustiva. A Tabela 2 mostra os resultados. O atributo isolado que resultou no melhor desempenho foi o NDVI, com uma taxa de acerto médio de aproximadamente 84%. Acrescentando os demais seis atributos espectrais ao NDVI, houve um aumento no desempenho de aproximadamente 7%. É interessante destacar que o maior

desempenho mostrado na Tabela 2 foi alcançado quando se utilizam seis atributos (somente os valores das bandas espectrais).

Tabela 2 - Conjunto ótimo de n atributos espectrais e o desempenho da classificação correspondente.

| Número de atributos espectrais | Conjunto ótimo de atributos espectrais | Taxa de acerto médio (%) |
|---------------------------------------|---|---------------------------------|
| 1 | NDVI | 84,47 |
| 2 | 4, NDVI | 86,51 |
| 3 | 4, 5, 7 | 89,92 |
| 4 | 2, 3, 5, NDVI | 89,95 |
| 5 | 1, 2, 4, 5, 7 | 91,89 |
| 6 | 1, 2, 3, 4, 5, 7 | 92,72 |
| 7 | Todos | 91,22 |

5.6.2.

Experimento 2: Desempenho do método para identificar as culturas agrícolas

Este experimento visava determinar o desempenho do método baseado em HMM na identificação das culturas agrícolas nas datas das seqüências de teste. Só foram utilizadas seqüências completas (seqüências com todas as datas disponíveis, desde a primeira data, para uma dada cultura em um dado segmento, até a última; isso para todas as culturas e todos os segmentos) neste experimento, não importando o comprimento delas. Além disso, só foram utilizados seis atributos espectrais (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) para descrever os símbolos observados, já que este foi o conjunto ótimo de atributos encontrado no experimento anterior. Os grupos de treinamento e teste foram os mesmos do experimento 1.

Tabela 3 - Taxas de acerto para a classificação de coberturas vegetais.

| Taxa de acerto por cobertura vegetal | |
|---|------------------|
| Coberturas vegetais | Taxas (%) |
| Soja (SJ) | 95 |
| Milho (MI) | 83 |
| Cana de açúcar (CA) | 96 |
| Pastagem (PS) | 92 |
| Mata-galeria (GA) | 91 |
| Taxa de acerto por cobertura vegetal global: | 94 |
| Taxa de acerto por cobertura vegetal médio: | 91 |

Tabela 4 - Matriz de confusão para a classificação de coberturas vegetais.

| Matriz de confusão | | | | | |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | SJ | MI | CA | PS | GA |
| SJ | 95 | 0 | 4 | 1 | 0 |
| MI | 3 | 25 | 1 | 1 | 0 |
| CA | 3 | 1 | 191 | 4 | 0 |
| PS | 0 | 0 | 1 | 23 | 1 |
| GA | 0 | 0 | 2 | 1 | 29 |

As Tabelas 3 e 4 mostram as taxas de acerto e a matriz de confusão para a classificação de coberturas vegetais, respectivamente. A Tabela 3 mostra que o método consegue identificar bem todas as coberturas vegetais, com uma taxa média de acerto de 91%. A Tabela 4 ratifica esta conclusão uma vez que a matriz de confusão mostra valores muito baixos ou nulos fora da diagonal principal.

Ao observar a matriz de confusão, é fácil identificar os casos nos quais o método mais errou. No caso da soja, por exemplo, percebe-se que na maioria das vezes em que ocorreu erro de classificação ela foi confundida com a cana de açúcar. Já o milho foi classificado erroneamente, em pouquíssimos casos, como soja e cana de açúcar. A cana de açúcar foi mais confundida com a pastagem do que com as outras coberturas vegetais. A pastagem, por sua vez, foi confundida com a cana de açúcar e com a mata-galeria e esta última foi classificada como cana de açúcar em duas ocasiões e como pastagem uma única vez.

5.6.3.

Experimento 3: Desempenho do método para identificar os estágios fenológicos

Este experimento teve como objetivo determinar o desempenho do método baseado em HMM na identificação dos estágios fenológicos nas datas das seqüências de teste. Assim como nos experimentos 1 e 2, só foram utilizadas aqui seqüências completas, não importando o comprimento delas.

De acordo com o que foi mencionado no experimento 2, só foram utilizados seis atributos espectrais (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) para descrever os símbolos observados e seqüências corretamente identificadas. Não houve alterações nos grupos de treinamento e teste em relação ao experimento anterior.

As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados encontrados. Mesmo a identificação do estágio fenológico não sendo o objetivo primário deste trabalho, os resultados

mostraram um bom desempenho do método para esse fim. Com exceção do estágio de crescimento, todos os outros foram bem classificados de uma forma geral. A Tabela 7 mostra que o experimento atingiu um acerto médio de 82%.

Tabela 5 - Taxas de acerto para a classificação de estados.

| Estados | Taxas (%) |
|--|------------------|
| Pré-plantio (PP) | 79 |
| Fase de crescimento (CR) | 55 |
| Fase adulta (AD) | 95 |
| Palhada (PA) | 97 |
| Taxa de acerto por estado global: | 88 |
| Taxa de acerto por estado médio: | 82 |

Tabela 6 - Matriz de confusão para a classificação de estados.

| Matriz de confusão (estados) | | | | |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | PP | CR | AD | PA |
| PP | 430 | 37 | 34 | 41 |
| CR | 54 | 220 | 119 | 7 |
| AD | 15 | 69 | 1838 | 4 |
| PA | 2 | 1 | 5 | 230 |

A maior parte dos erros ocorreu na identificação da fase de crescimento. Isso pode ser explicado pela evolução temporal das culturas ao longo de seus ciclos fenológicos. Durante os estágios de pré-plantio, fase adulta e palhada (pós-colheita), não ocorrem mudanças significativas nas respostas espectrais das culturas. Por outro lado, a resposta espectral da fase de crescimento muda continuamente, variando desde o pré-plantio até a fase adulta. Dessa forma, sua resposta espectral pode estar próxima da resposta destes dois estágios, ou adotar valores intermediários, dependendo do momento em que a imagem é adquirida, o que pode gerar erro de classificação. A Tabela 6 confirma essa interpretação, já que a matriz de confusão mostra que a fase de crescimento é confundida com frequência com a fase adulta e o pré-plantio. Essa variação ao longo do tempo não pode ser bem modelada por uma simples distribuição Gaussiana dos vetores contendo as respostas espectrais. Essa característica sugere que a fase de crescimento poderia ser melhor descrita a partir das derivadas temporais ao invés dos valores absolutos das respostas espectrais. Esta alternativa não foi, contudo, investigada neste trabalho.

5.6.4.

Experimento 4: Avaliação da influência do comprimento das seqüências sendo utilizadas no desempenho do método

Outro aspecto importante para a avaliação do método é o comprimento das seqüências de imagens consideradas. Este experimento teve como objetivo avaliar a influência do comprimento das seqüências sobre o desempenho do método proposto.

Foram consideradas seqüências de tamanhos variados, indo de 2 até 12 (comprimento máximo possível) tanto para o treinamento quanto para o teste. Em todos os casos, as seqüências de testes foram selecionadas observando a condição de que a cobertura vegetal do segmento analisado seja a mesma em todas as datas da seqüência. Ressalte-se que para este experimento foram novamente utilizados apenas os atributos espectrais 1, 2, 3, 4, 5 e 7, pois, como foi mostrado na Tabela 2, este é o conjunto ótimo de atributos que proporciona o melhor desempenho do método em questão

A Tabela 7 mostra o resultado deste experimento.

Tabela 7 - Taxas de acerto para seqüências de tamanhos variados.

| Comprimento das seqüências | Taxa de acerto por classe (%) | | | | | Taxa de acerto global | Taxa de acerto médio |
|----------------------------|-------------------------------|-----|-----|----|----|-----------------------|----------------------|
| | Coberturas vegetais | | | | | | |
| | SJ | MI | CA | PS | GA | | |
| 2 | 84 | 76 | 79 | 69 | 72 | 78 | 76 |
| 3 | 88 | 83 | 86 | 76 | 74 | 84 | 81 |
| 4 | 90 | 88 | 92 | 77 | 75 | 88 | 84 |
| 5 | 91 | 90 | 95 | 78 | 74 | 91 | 86 |
| 6 | 90 | 94 | 97 | 82 | 74 | 92 | 87 |
| 7 | 91 | 88 | 98 | 85 | 74 | 93 | 87 |
| 8 | 92 | 100 | 99 | 85 | 76 | 93 | 90 |
| 9 | 92 | X | 99 | 85 | 77 | 93 | 88 |
| 10 | 91 | X | 99 | 87 | 80 | 94 | 89 |
| 11 | 93 | X | 99 | 88 | 84 | 94 | 91 |
| 12 | 92 | X | 100 | 90 | 89 | 96 | 93 |

Na área de estudo, em todos os talhões onde havia o plantio do milho, este era alternado com o plantio da soja. Como só estão disponíveis 12 imagens, não existem seqüências de milho de comprimento maior do que 9, o que explica o

símbolo X em algumas posições da tabela acima. Isso não acontece para a soja, cana de açúcar, pastagem e mata-galeria.

Os resultados da Tabela 7 mostram que quanto maior é a seqüência, maior é a taxa de acerto global. Isto se dá devido ao fato de que, quanto mais longa a seqüência, mais informação haverá no que basear a classificação, melhorando assim o seu desempenho.

5.6.5.

Experimento 5: Determinação dos estágios fenológicos que melhor caracterizam cada cultura

Um outro experimento foi conduzido para determinar quais estágios fenológicos melhor caracterizam cada tipo de cultura. Em outras palavras procurou-se determinar quais estágios fenológicos geram as maiores taxas de acerto para a classificação das culturas.

Neste experimento foram utilizados os mesmos atributos espectrais (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) para descrever os símbolos observados que nos experimentos anteriores.

As Tabelas 8, 9 e 10 mostram esses resultados. O símbolo ✓ indica quais os estados estão obrigatoriamente presentes nas seqüências de teste. Assim, a primeira linha da Tabela 10 indica que em 94% das seqüências de soja em que o estágio de pré-plantio (PP) esteve presente a cultura foi reconhecida corretamente. De modo semelhante, em 97% das seqüências de soja em que tanto o estágio de pré-plantio (PP) quanto o estágio de palhada (PA) estão presentes (5ª linha da Tabela 8) o método identificou corretamente a cultura. Nessas tabelas, estão destacadas em amarelo as linhas correspondentes às combinações de estados que geraram as maiores taxas de acerto por cultura. É preciso ressaltar que o número de seqüências disponíveis, quando se fazem as restrições de estados obrigatoriamente presentes, varia de uma cultura para a outra. O milho, por exemplo, é a cultura com menos seqüências disponíveis. Este dado encontra-se na última coluna das Tabelas 8, 9 e 10.

Para a soja (Tabela 8) percebe-se que o estado mais característico é a palhada. Este estado está presente em todas as combinações de estados que geraram as taxas de acerto mais elevadas. Isto, de certa forma, pode ser explicado

pelo fato da quantidade de palhada na fase de pós-colheita ser fortemente influenciada pela cultura que estava plantada na região.

Depois da palhada, os estados mais característicos são a fase de crescimento e a fase adulta. A fase de crescimento apesar de enfrentar os problemas discutidos na Seção 5.6.2 é bem variada entre as culturas, uma vez que cada uma delas possui um ciclo fenológico distinto e passa pela etapa de crescimento de forma diferenciada. A fase adulta por sua vez, como também foi discutido na Seção 5.6.2, é um estado mais estável e característico de cada cultura.

O pré-plantio, estado menos característico, é na verdade o solo exposto, não variando muito de uma cultura para a outra, trazendo portanto pouca contribuição para identificar a cultura.

Para a soja, nota-se também que entre as combinações de estados obrigatoriamente presentes nas seqüências que geraram 100% de acerto está a seqüência com todos os estados presentes e apenas o CR, AD e PA. De um modo geral neste caso, com mais estados presentes na seqüência analisada, o método comporta-se melhor. É preciso destacar que na 10ª e 14ª linhas, apesar da taxa de acerto ter sido de 100%, o número de seqüências usadas para o teste era muito baixo o que torna as contribuições desses dados menos significativas.

Tabela 8 - Taxas de acerto para seqüências de soja com certos estados (indicados por ✓) obrigatoriamente presentes.

| Estados Presentes | | | | Taxa de acerto: SJ (%) | Número de seqüências disponíveis |
|-------------------|----|----|----|------------------------|----------------------------------|
| PP | CR | AD | PA | | |
| ✓ | | | | 94 | 85 |
| | ✓ | | | 94 | 34 |
| | | ✓ | | 96 | 93 |
| | | | ✓ | 98 | 44 |
| ✓ | | | ✓ | 97 | 30 |
| ✓ | ✓ | | | 93 | 28 |
| ✓ | | ✓ | | 95 | 79 |
| | ✓ | | ✓ | 100 | 15 |
| | ✓ | ✓ | | 96 | 27 |
| | | ✓ | ✓ | 98 | 42 |
| ✓ | ✓ | | ✓ | 100 | 9 |
| ✓ | | ✓ | ✓ | 97 | 29 |
| ✓ | ✓ | ✓ | | 95 | 22 |
| | ✓ | ✓ | ✓ | 100 | 13 |
| ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 100 | 8 |

Para o milho, a Tabela 9 mostra que os estágios mais característicos são a fase adulta e a palhada. Isto já era esperado em vista do que foi discutido na seção anterior, porém, as maiores taxas de acerto foram alcançadas quando esses estados estavam obrigatoriamente presentes nas seqüências de teste separadamente. Isto pode ser entendido, considerando a base de dados disponível para este trabalho (Apêndice II). Efetivamente, há poucas seqüências de milho disponíveis, sendo ainda em menor número as seqüências com combinações de três ou mais estados. Dessa forma, por exemplo, ao forçar que todos os estados estejam presentes reduzem-se substancialmente as amostras disponíveis para teste, como mostra a última coluna da Tabela 9, o que condiciona os resultados do método. Este fato verifica-se também com a cana de açúcar, conforme exposto na Tabela 10.

O milho é fortemente afetado pelo problema discutido na Seção 4.2, ou seja, algumas imagens consecutivas no banco de dados estão separadas por vários meses.

Tabela 9 - Taxas de acerto para seqüências de milho com certos estados (indicados por ✓) obrigatoriamente presentes.

| Estados Presentes | | | | Taxa de acerto: MI (%) | Número de seqüências disponíveis |
|-------------------|----|----|----|------------------------|----------------------------------|
| PP | CR | AD | PA | | |
| ✓ | | | | 77 | 13 |
| | ✓ | | | 75 | 16 |
| | | ✓ | | 88 | 25 |
| | | | ✓ | 87 | 23 |
| ✓ | | | ✓ | 80 | 10 |
| ✓ | ✓ | | | 71 | 7 |
| ✓ | | ✓ | | 82 | 11 |
| | ✓ | | ✓ | 83 | 12 |
| | ✓ | ✓ | | 82 | 11 |
| | | ✓ | ✓ | 86 | 21 |
| ✓ | ✓ | | ✓ | 80 | 5 |
| ✓ | | ✓ | ✓ | 78 | 9 |
| ✓ | ✓ | ✓ | | 80 | 5 |
| | ✓ | ✓ | ✓ | 80 | 10 |
| ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 75 | 4 |

Para a cana de açúcar não houve muita variação entre as taxas de acerto, como mostra a Tabela 10, sendo a diferença entre o valor mínimo e máximo igual a 5%. Apesar disso, percebe-se que nas linhas destacadas em amarelo, onde as

taxas de acerto são maiores, os estados de CR, AD e PA são igualmente distintivos desta cultura. Vale destacar que para essas combinações de estados a taxa de acerto variou apenas em um ponto percentual.

Tabela 10 - Taxas de acerto para seqüências de cana de açúcar com certos estados (indicados por ✓) obrigatoriamente presentes.

| Estados Presentes | | | | Taxa de acerto: CA(%) | Número de seqüências disponíveis |
|-------------------|----|----|----|-----------------------|----------------------------------|
| PP | CR | AD | PA | | |
| ✓ | | | | 95 | 149 |
| | ✓ | | | 96 | 150 |
| | | ✓ | | 96 | 195 |
| | | | ✓ | 96 | 74 |
| ✓ | | | ✓ | 92 | 39 |
| ✓ | ✓ | | | 94 | 105 |
| ✓ | | ✓ | | 94 | 145 |
| | ✓ | | ✓ | 97 | 59 |
| | ✓ | ✓ | | 96 | 146 |
| | | ✓ | ✓ | 96 | 73 |
| ✓ | ✓ | | ✓ | 92 | 26 |
| ✓ | | ✓ | ✓ | 92 | 38 |
| ✓ | ✓ | ✓ | | 94 | 101 |
| | ✓ | ✓ | ✓ | 97 | 58 |
| ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 92 | 25 |

Para a pastagem e mata-galeria, este experimento não acrescenta nenhuma informação à análise do método uma vez que essas culturas se encontram em um único estágio fenológico, a fase adulta.

5.6.6.

Experimento 6: Comparação do método multitemporal baseado em HMMs com uma abordagem monotemporal de máxima verossimilhança

Um experimento final foi conduzido para fins de comparação. O objetivo foi comparar o método multitemporal proposto com uma abordagem monotemporal.

Pode-se demonstrar que, para seqüências de imagens de uma única data, o HMM concebido neste trabalho se torna um banco de classificadores de máxima verossimilhança, onde cada tipo de cobertura vegetal é representado por tantas classes quantos forem os estágios fenológicos.

A Tabela 11 mostra os resultados deste experimento. Quando foram consideradas amostras em qualquer estágio fenológico, a taxa de acerto médio foi de aproximadamente 70%.

O experimento foi repetido três vezes, retirando amostras nos estágios PP, PA e CR respectivamente. O melhor resultado obtido para esses experimentos foi de uma taxa de acerto médio de 74%.

Relembrando o resultado da Tabela 3, onde a taxa de acerto médio foi de 91%, fica clara a superioridade de uma abordagem multitemporal sobre a monotemporal.

Tabela 11 - Desempenho da abordagem monotemporal.

| Estágios fenológico presentes na amostra | Taxa de acerto médio (%) |
|---|---------------------------------|
| PP, CR, AD, PA | 70 |
| CR, AD, PA | 69 |
| CR, AD | 71 |
| AD | 74 |