

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**UTILIZAÇÃO DE DADOS PALSAR/ALOS (BANDA L) NO
MONITORAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR.**

MICHELLE CRISTINA ARAÚJO PICOLI

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**UTILIZAÇÃO DE DADOS PALSAR/ALOS (BANDA L) NO
MONITORAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR.**

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora
para obtenção do título de Doutor em Engenharia
Agrícola, na área de concentração em Planejamento e
Desenvolvimento Rural Sustentável.

MICHELLE CRISTINA ARAÚJO PICOLI

Orientador: Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

P587u Picoli, Michelle Cristina Araújo
Utilização de dados PALSAR/ALOS (banda L) no monitoramento da cana-de-açúcar / Michelle Cristina Araújo Picoli. - Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Rubens Augusto Camargo Lamparelli.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Sensoriamento remoto. 2. Radar de abertura sintética. 3. Modelagem de dados. 4. Processamento de imagens - Métodos estatísticos. 5. Produtividade agrícola. I. Lamparelli, Rubens Augusto Camargo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Monitoring sugarcane with PALSAR/ALOS (L band) data

Palavras-chave em Inglês: Remote sensing, Synthetic aperture radar, Data modeling, Image processing - Statistical methods, Productivity agrícola

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

Titulação: Doutora em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: José Claudio Mura, Gabriel Constantino Blain,
Alexandre Camargo Coutinho, Jansle Vieira Rocha

Data da defesa: 27-02-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Michelle Cristina Araújo Picoli**, aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de fevereiro de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Aos meus pais, à minha irmã e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP – projeto 2008/06043-5) pelo apoio financeiro.

A Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e, em particular, à Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), pela oportunidade de realizar este estudo e utilizar seus equipamentos e instalações.

Ao meu orientador Dr. Rubens A. C. Lamparelli, pelo conhecimento compartilhado, pela orientação e apoio na realização deste trabalho, pelo coleguismo e, principalmente, pela confiança em mim depositada quando aceitou ser o meu orientador.

Ao Dr. Jansle V. Rocha, pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho e pelo coleguismo.

Ao Dr. Edson E. Sano (Embrapa Cerrados), por ter dividido seu vasto conhecimento, pelo apoio em todas as etapas desse trabalho, pela motivação em trabalhar com os dados SAR e principalmente pela sua atenção.

Ao grupo Raízen e a Usina Bonfim, por fornecer os mapas e dados utilizados neste trabalho e, em especial, aos senhores Jefferson R. B. Mello e Fernando Benvenuti, pela presteza em disponibilizar as informações e pelos esclarecimentos dados ao longo desse trabalho.

À Dra. Laura Hess (Universidade da Califórnia), pela gentileza em ter fornecido algumas das imagens PALSAR/ALOS.

Ao Agmon M. Rocha, técnico do Laboratório de Geoprocessamento (FEAGRI/UNICAMP), que deu todo suporte para que esta tese fosse viabilizada.

Aos meus amigos do curso de pós-graduação em Engenharia Agrícola, que tornaram mais agradável o período que passamos juntos, no Laboratório de Geoprocessamento: Johann, Jefersson, Pedro, Agmon, Gleyce, Rafael e Christiano.

Aos meus pais: Cândida e Carlos, à minha amiga e irmã Dede e ao meu cunhado Gabi por sempre acreditarem em mim e me apoiarem acima de tudo.

Ao Marcelo pela ajuda e compreensão nos momentos mais difíceis, pelo companheirismo, amizade e carinho.

À minha família, principalmente a família Matias Aires, por todo amor partilhado.

Aos grandes amigos, pelos momentos felizes, e um agradecimento especial para as amigas Mari e Loli, pelo amor incondicional e compreensão desmedida.

“Um passo à frente e você não está mais no mesmo lugar”

Chico Science

RESUMO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) exerce papel fundamental na economia na medida em que fornece matéria prima para a produção das *comodities* açúcar e álcool. Dentro deste contexto a necessidade de informações, as quais possibilitam o acompanhamento desta, é extremamente importante porque permite avaliar a disponibilidade da matéria prima e sua demanda. Para isto, é necessário o monitoramento constante da cultura e uma das formas de se fazer é com o uso de imagens de sensoriamento remoto. Porém, sabe-se que nem sempre isso é possível devido aos períodos chuvosos que ocorrem durante a safra e, portanto, dificultando a aquisição de imagens de satélite livre de nuvens. Para tentar minimizar este problema, a utilização de sensores ativos, como é o caso dos sensores radar de abertura sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*), pode ajudar. Os sensores SAR podem coletar dados da superfície em áreas com freqüente cobertura de nuvens e névoa, operando inclusive à noite. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo: analisar o potencial das imagens de radar PALSAR/ALOS, polarizações HH e HV, no monitoramento da cultura de cana-de-açúcar, determinar os efeitos das linhas de plantio em culturas de cana-de-açúcar nessas imagens de radar e estimar a produtividade agrícola em talhões de cana-de-açúcar, por meio de um modelo utilizando imagens de radar do sensor PALSAR/ALOS e dados agronômicos, nas safras: 2007/08, 2008/09, 2009/10 na região nordeste do Estado de São Paulo. Os resultados mostraram que foi capaz de detectar mudanças na estrutura (biomassa) da cana-de-açúcar. Os valores médios do coeficiente de retroespalhamento (σ°), provenientes de talhões, com linhas de plantio perpendiculares, na polarização HH, foram mais altos que os dos talhões com linhas paralelas à linha de visada do sensor (0,7 a 2,3 dB mais altos, 1,2 dB em média). Para a polarização HV não houve diferença estatisticamente significativa. Já os modelos de estimativa de produtividade explicaram 79%, 12% e 74% da variação da produtividade agrícola observada nos talhões nos anos safra 2007/08, 2008/09 e 2009/10, respectivamente, e o modelo considerando as três safras juntas explicou 66%. Esses resultados podem ser usados para auxiliar e aprimorar a estimativa da produtividade feita *in loco*, e, principalmente, proporcionar uma alternativa ao monitoramento da cultura sob quaisquer condições climáticas. Palavras-chave: *Saccharum spp.*, SAR, biomassa, fases fenológicas, direção da linha de plantio, estimativa de produtividade.

ABSTRACT

The sugarcane (*Saccharum spp.*) plays important role in economy because it is source of raw material for sugar and alcohol production. In this context the information needs, which enables its monitoring is very important due to allows evaluate the availability of raw material and its demands. For this, it is need a crop systematical monitoring and one of the ways to do this is through the use of remote sensing images. However, it known that it is not always possible due to the rainy season that occurs in certain periods during the crop phenological phases, impeding the acquisition of optics satellite images free of clouds. To get around this problem the use of active sensors, such as sensors of synthetic aperture radar (SAR) can help. SAR sensors can collect data in areas with frequent cloud cover and fog and can operate even at night. Therefore, this study aimed to analyze the potential of radar PALSAR/ALOS, in HH and HV polarizations, for monitoring the sugarcane crop, to determine the effects of planting rows on the backscatter and estimate sugarcane yield by means of model using radar sensor PALSAR/ALOS and agronomic data, in crop seasons: 2007/08, 2008/09, 2009/10 in northeastern region of São Paulo. The results are promising because it was able to show changing in biomass enabling the monitoring. The mean values of the backscattering coefficient (σ°) from fields with perpendicular rows, in HH polarization, were higher than those from parallel rows to the range direction of the satellite (0.7 to 2.3 dB over high, 1.2 dB on average). For HV polarization, there was no statistically significant difference. The yield model estimation, explained 79%, 12% and 74% of the variation in final yield, observed in the plots, in crop seasons 2007/08, 2008/09 and 2009/10, respectively, and the model built for the three crop seasons together explained 66% . These results can be used to assist and improve the prediction of yield performed *in loco*, and mainly to afford an alternative for crop monitoring in some weather conditions.

Keywords: *Saccharum spp.*, SAR, biomass, phenological phases, direction of planting row, estimate *in loco*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Época das operações agrícolas para a cana-de-açúcar na região Centro-Sul.....	9
Figura 2.2: Contribuições no retroespalhamento agrícola.....	13
Figura 3.1: Área de estudo.....	16
Figura 4.1: Valores de precipitação e <i>Standardized Precipitation Index</i> (SPI) (a) e balanço hídrico decendial (b) da área de estudo no ano de 2008.....	36
Figura 4.2: Retroespalhamento nas polarizações HH e HV das três variedades no dia 24 de maio de 2008.	38
Figura 4.3: Variação dos valores de retroespalhamento das diferentes variedades, em diferentes estágios fenológicos, e de diferentes alvos do sensor PALSAR na data de 24 de maio de 2008.	39
Figura 4.4: Variação dos valores de retroespalhamento das diferentes variedades, em diferentes estágios fenológicos, e de diferentes alvos do sensor PALSAR na data de 24 de agosto de 2008.....	41
Figura 4.5: Variação dos valores de retroespalhamento das diferentes variedades, em diferentes estágios fenológicos, e de diferentes alvos do sensor PALSAR na data de 09 de outubro de 2008.....	43
Figura 4.6: Comportamento temporal do retroespalhamento das variedades estudadas RB85-5156 (a), RB92-5345 (b) e RB86-7515 (c) e suas respectivas fases fenológicas.....	44
Figure 5.1: Diagram used to classify sugarcane plots into parallel and perpendicular to the sensor's look direction. Source: adapted from SILVA et al. (2009).....	56
Figure 5.2: Representation of the distance between the planting rows of sugarcane (a) and the distance between plants within a single planting row (b).....	57
Figure 5.3: Mean σ° from the plots of sugarcane, water balance estimation and rainfall data from the study area. M = month.	59
Figure 5.4: PALSAR HH-polarized image from 22 february 2008 (a), QuickBird optical image available in the Google Earth™ program from april 2008 (b) and PALSAR HH-polarized image from 8 april 2008 (c) overpasses. Parallel plots are outlined in red while perpendicular plots are outlined in green.	62
Figure 5.5: Panoramic field photo obtained in 14 may 2010, illustrating a typical directional terrain roughness found in the study area after sugarcane harvesting.....	63

Figura 6.1. Relação entre a produtividade real e a produtividade estimada pelo modelo agrônomo nas safras 2007/08 (a), 2008/09 (b), 2009/10 (c) e todas as safras (d).	79
Figura 6.2: Variação temporal do balanço hídrico e da precipitação ao longo das três safras (2007/08, 2008/09 e 2009/10).	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Produtividade média da cana-de-açúcar para diferentes estágios de corte, para os anos safras de 1998 até 2003.	8
Tabela 3.1: Característica do sensor PALSAR a bordo do satélite ALOS.	17
Tabela 3.2: Data de aquisição das imagens do sensor PALSAR a bordo do satélite ALOS.	18
Tabela 3.3: Características agronômicas das variedades de cana-de-açúcar RB85-5156, RB92-5345 e RB86-7515 consideradas nesse estudo.	19
Tabela 4.1: Características agronômicas das variedades de cana-de-açúcar RB85-5156, RB92-5345 e RB86-7515 consideradas nesse estudo.	33
Tabela 4.2: Características das imagens do sensor PALSAR analisadas nesse estudo.	34
Tabela 4.3: Precipitação diária e acumulada de três dias na área de estudo e nos dias da passagem do sensor PALSAR.	37
Tabela 4.4: Teste de Mann-Whitney para diferentes variedades de cana-de-açúcar.	40
Table 5.1: Characteristics of ALOS PALSAR images analyzed in this research. FBS = fine beam single mode; FBD = fine beam dual mode.	54
Table 5.2: Calibration factors of PALSAR images.	55
Table 5.3: P-values obtained by the Mann-Whitney test applied to sugarcane's backscattering coefficients grouped into parallel and perpendicular plots to the satellite look direction.	60
Tabela 6.2. Coeficientes estimados pela análise de regressão (coef), teste t (t) e p-valores (p).	77
Tabela 6.3. Produtividade média real (PMR) e o desvio padrão (s), produtividade média estimada pelo modelo de estimava (PME) e o desvio padrão (s), coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado), variabilidade sobre a reta de regressão (S), índice de concordância (<i>d</i>) de Willmott, erro aleatório (EA), erro padrão (EP) e o teste t do modelo agrônomico para as safras 2007/08, 2008/09, 2009/10 e para todas as safras.	78

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
1.1 Hipóteses	3
1.2 Objetivos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Aspectos da cultura da cana-de-açúcar.....	5
2.1.1 Fisiologia	5
2.1.2 Produtividade agrícola.....	6
2.1.3 Variedades	6
2.1.4 Estágio de corte	7
2.1.5 Época de plantio	8
2.2 Sensoriamento remoto aplicado à cultura da cana-de-açúcar.....	10
2.3 Parâmetros que interferem no imageamento de radar	12
2.3.1 Parâmetros relacionados aos alvos	13
2.4 Banda L	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
3.1 Área de estudo	16
3.2 Materiais	17
3.2.1 Dados espectrais	17
3.2.1 Dados cana-de-açúcar.....	18
3.3 Método.....	26
3.3.1 Processamento das imagens.....	26
3.3.2 Análise estatística	26
4. MONITORAMENTO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO IMAGENS DO SENSOR PALSAR/ALOS	30
4.1 Introdução.....	30
4.2 Materiais e Métodos	32
4.3 Resultados e Discussão.....	35

4.4 Conclusões.....	46
Referências	46
5. DISCRIMINATION OF SUGARCANE’S PLANTING ROW DIRECTION IN THE ALOS/PALSAR SATELLITE IMAGES	51
5.1 Introduction	52
5.2 Materials and Methods	53
5.2.1 Study area	53
5.2.2 Database	54
5.3 Results and Discussion.....	56
5.4 Conclusions	63
References	64
6. O USO DE DADOS PALSAR/ALOS NA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇÚCAR	68
6.1 Introdução.....	69
6.2 Materiais e Métodos	69
6.2.1 Características das variedades de cana-de-açúcar	71
6.2.2 Dados de radar	72
6.2.3 Dados agronômicos	73
6.2.4 Variáveis do modelo.....	74
6.3 Resultados e Discussão.....	76
6.4 Conclusão	82
Referências	82
7. CONCLUSÕES GERAIS	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	87

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O investimento global em energia renovável vem, a cada ano, batendo novos recordes. O apoio governamental e o investimento crescente da iniciativa privada são os principais impulsionadores desse mercado. Um dos caminhos mais promissores na geração de energia renovável está nos biocombustíveis, principalmente no oriundo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): o etanol.

Desde que o Programa Nacional do Alcool foi implantado no Brasil, financiado pelo governo brasileiro na década de 70, a produção vegetal (toneladas) da cana-de-açúcar aumentou de 67.759.180 em 1970 para 384.165.158 toneladas em 2006 (IBGE, 2010). Atualmente, as indústrias brasileiras sucroalcooleiras transformam anualmente metade de sua safra de cana-de-açúcar em 24 bilhões de litros de etanol para abastecer 12,5 milhões de veículos (MORAES, 2011).

Existe um grande interesse em estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar, pois, auxiliaria no planejamento de uma série de atividades do agronegócio no setor sucroalcooleiro e também para o planejamento das operações nas usinas.

Estudos que utilizam dados de sensoriamento remoto para auxiliar na estimativa da produtividade de culturas agrícolas podem ser encontrados em RUDORFF & BATISTA (1990; 1991), RUDORFF et al. (1995), BERKA et al. (2003) e RIZZI & RUDORFF (2007) e mais recentemente em PICOLI et al. (2009), BECKER-RESHEF et al. (2010) e em FERNANDES et al. (2011). RUDORFF & BATISTA (1985) concluíram que a melhor época para aquisição de imagens, com a finalidade de relacionar a resposta espectral com peso dos colmos, situa-se em torno do mês de Fevereiro. Isto ocorre pelo fato da biomassa fotossinteticamente ativa encontrar-se bem desenvolvida nesta época e ter uma forte relação com a quantidade de colmos. No entanto, fevereiro é um mês chuvoso no Estado de São Paulo (clima tropical), portanto, há dificuldade na aquisição de imagens de satélite livres de nuvens.

Para minimizar este problema, a utilização de sensores ativos, como é o caso dos sensores radar de abertura sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*), pode ajudar. Os sensores SAR podem coletar dados em áreas com frequente cobertura de nuvens e névoa, operando inclusive à noite. Por ser um sensor que pode coletar dados em diferentes polarizações, é possível obter imagens multi-polarizadas que permitem uma melhor

discriminação e reconhecimento de objetos na superfície, e maior capacidade de classificação das imagens (MCNAIRN et al., 2004; MCNAIRN & BRISCO, 2004).

Alguns trabalhos como o de YUN et al. (1995) utilizaram dados SAR para o monitoramento agrícola da cana-de-açúcar, e observaram um padrão homogêneo do coeficiente de retroespalhamento (σ°) dentro de uma mesma variedade. Em outro estudo com dados SAR na banda C, polarização HH, SIMÕES (1999) analisou os valores de σ° de duas variedades: uma com porte ereto e folhas finas (SP71-1406) e outra com porte planófilo e folhas largas (RB 72-454). A variedade SP71-1406, por possuir dossel heterogêneo, obteve maior retroespalhamento múltiplo ($\sigma^\circ > -9$ db), e a variedade RB72-454, por possuir estrutura planófila e folhas largas, obteve uma redução no coeficiente de retroespalhamento (-10 db $< \sigma^\circ < -9$ db). Esses resultados mostram que os dados SAR são sensíveis a mudanças na estrutura da cultura (biomassa), indicando a possibilidade de distinguir diferentes estágios fenológicos. BAGHDADI et al. (2009) monitoraram a cana-de-açúcar nas bandas: X, C e L, com diferentes ângulos de incidência e diferentes polarizações e concluíram que, para observar mudanças na altura da cultura em estágio inicial (altura menor que 100 – 150 cm), o ideal é utilizar altos ângulos de incidência e menor comprimento de onda.

Apesar de todo o desenvolvimento tecnológico e metodológico obtido, ainda são esperados novos avanços no que se refere ao potencial do uso de imagens SAR para auxiliar no monitoramento e na estimativa de produtividade da cana-de-açúcar, pois são poucos os estudos que utilizam esse tipo de dado.

O sensor utilizado neste trabalho, o PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) a bordo do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) da Agência Espacial Japonesa (JAXA), foi escolhido, pois opera na banda L (23, 6 cm) e possui multi-polarização (HH, VV, HV e VH), com variação do ângulo de incidência entre 18° a 48°, larguras de faixas imageadas de 40 a 360 km e resoluções nominais de 7 a 100 m, dependendo do modo de aquisição.

A banda L é a mais indicada para este trabalho, pois possui alta correlação com dados de biomassa de culturas agrícolas (BRISCO et al., 1992; PAMPALONI et al., 1997), porém seu uso ainda é pouco explorado. Além disso, está previsto para 2013 o lançamento do satélite ALOS-2, que também terá o sensor PALSAR que irá operar na mesma banda (banda L), sendo assim, o método estudado poderá futuramente ser utilizado como subsídio nos

estudos com dados do satélite ALOS-2 (http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index_e.html). SILVA et al. (2009) trabalhou com dados da banda L das culturas de algodão, café e pastagem, e, constatou que a polarização HV foi a melhor para distinguir campos de pastagens, e, a medida que se considerou mais de uma polarização o poder de distinção entre alvos aumentou. A utilização das polarizações VV e HV tornou possível separar café de pastagem, e, HH e HV foi ideal para separar diferentes campos de pastagens. A combinação de VV, HV e HH foi a mais efetiva na separação das culturas.

1.1 Hipóteses

As seguintes hipóteses foram consideradas:

É possível discriminar diferentes estágios fenológicos observando se há mudança na estrutura (biomassa) da cana-de-açúcar utilizando dados PALSAR;

As direções das linhas de plantio, dos talhões de cana-de-açúcar, influenciam nos valores de retroespalhamento;

Dados PALSAR auxiliam na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar realizada *in loco*.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do trabalho foi desenvolver uma metodologia para utilizar imagens SAR do sensor PALSAR, banda L, com o propósito de monitorar, discriminar mudanças na estrutura (biomassa) da cana-de-açúcar, verificar a possível influência do direcionamento das linhas de plantio nos dados PALSAR e utilizar dados de retroespalhamento, de áreas com cana-de-açúcar, em modelos de estimativa de produtividade agrícola das lavouras, para as safras 2006/07, 2007/08 e 2008/09, na região nordeste do Estado de São Paulo.

O objetivo foi dividido em três partes, no formato de artigos, organizado da seguinte maneira: o Capítulo 4 apresenta o artigo “Monitoramento da cultura da cana-de-açúcar por meio de imagens do sensor PALSAR/ALOS”. Este artigo analisa o potencial das imagens de radar PALSAR/ALOS (banda L, polarizações HH e HV) no monitoramento da cultura de cana-de-açúcar e verifica a capacidade deste, discriminar mudanças na estrutura (biomassa) da cana-de-açúcar. O Capítulo 5 possui o artigo “Discrimination of sugarcane’s planting row direction in the ALOS/PALSAR satellite images” que investiga a magnitude da influência da direção das linhas de plantio dos talhões de cana-de-açúcar na banda L, nas polarizações HH e

HV nas imagens do sensor PALSAR/ALOS. O artigo apresentado no Capítulo 6, “O uso das imagens PALSAR na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar”, utiliza dados agronômicos e dados do sensor PALSAR/ALOS (banda L, polarização HH) para estimar a produtividade agrícola em talhões de cana-de-açúcar por meio de um modelo, nas safras: 2007/08, 2008/09 e 2009/10.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos da cultura da cana-de-açúcar

2.1.1 Fisiologia

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é uma gramínea semi-perene e originária provavelmente do sudoeste da Ásia. Não é uma cultura exigente em solo, porém, se desenvolve melhor em solos com boa aeração, boa drenagem e com profundidade maior que um metro (COPERSUCAR, 1988).

O primeiro ciclo da cultura, chamada de cana planta, pode ser de 12 meses (cana de ano – CA) ou 18 meses (cana de ano e meio – CAM). Após o primeiro corte, o ciclo passa a ser de 12 meses para todas as variedades, conhecida como cana soca (CS). A mesma cana-de-açúcar pode ser colhida cinco ou mais vezes, porém, a cada ciclo devem ser feitos investimentos significativos em insumos e tratos culturais para manter a produtividade (UNICA, 2004).

Os fatores ambientais que afetam de maneira marcante a produção de cana-de-açúcar são: temperatura, luz (intensidade), e disponibilidade de água e nutrientes (AFONSI et al., 1987). A cana-de-açúcar se desenvolve bem em regiões de clima quente, com temperatura oscilando entre 16°C e 33°C. No entanto, temperaturas inferiores a 21°C reduzem a taxa de alongamento dos colmos e promovem o acúmulo de sacarose (MAGALHÃES, 1987).

A cana-de-açúcar apresenta uma grande capacidade fotossintética (FORTES, 2003) e responde bem a elevadas intensidades luminosas. A radiação solar afeta todos os estágios de desenvolvimento da cultura e quando se desenvolve sob condições de baixa luminosidade, apresenta colmos finos e longos, o que diminui o acúmulo de matéria seca (LUCCHESI, 1995).

No decorrer do ciclo de crescimento e desenvolvimento, a cana-de-açúcar atravessa dois períodos distintos com relação ao teor de sacarose: o primeiro é assinalado por um intenso crescimento vegetativo acompanhado por uma gradual formação de sacarose, enquanto, no segundo, ocorre um predominante acúmulo de sacarose, motivado pela escassez de dados dos principais fatores de desenvolvimento vegetativo, como temperatura e água disponível (MAGALHÃES, 1987 e LUCCHESI, 1995).

A maturação é um processo fisiológico afetado por vários fatores naturais, como a própria variedade, condições climáticas, tipo de solo e tratos culturais. As variedades de cana-de-açúcar têm comportamentos distintos, apresentando níveis diferentes de sacarose mesmo quando cultivada nas mesmas condições (NUNES JUNIOR, 1987). O estágio de maturação é verificado principalmente pelos teores de sacarose, de açúcares redutores e umidade que os colmos apresentam no decorrer do período da safra.

2.1.2 Produtividade agrícola

A cana-de-açúcar é insuperável em termos de produção de matéria seca e energia por hectare em um único corte. Nas condições de Brasil Central, a produção de cana-de-açúcar integral fresca por hectare por corte varia entre 60 e 120 toneladas, por um período de até cinco anos, obtendo maior produtividade no primeiro ano (THIAGO e VIEIRA, 2002).

A produtividade da cana-de-açúcar (produtividade = produção de toneladas de colmos / área colhida em hectares) está diretamente relacionada com o seu perfilhamento. A adubação nitrogenada promove aumento de produção, porém pode aumentar o perfilhamento das plantas, o que nem sempre é bom, pois muitos perfilhos não indicam maior produtividade. O índice de perfilhamento da cana-de-açúcar é uma característica varietal. A capacidade que uma planta apresenta de mobilizar suas reservas, emitindo mais ou menos brotos em determinada condição ambiental é o que a caracteriza em alto, médio ou baixo índice de brotação. As recomendações de adubação nitrogenada para cana planta não são bem estabelecidas por um provável desconhecimento das bases fisiológicas para as respostas ao nitrogênio aplicado como fertilizante, pois o excesso de dosagem poderia aumentar muito o número de perfilhos podendo prejudicar o peso individual dos colmos, ou seja, a produtividade da planta (MAGALHÃES, 1987). O clima, a variedade, o tipo de solo, o estágio de corte, a data do plantio, entre outros, são fatores que também influenciam na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (MAXIMILIANO, 2002).

2.1.3 Variedades

As necessidades da cana para uma boa produtividade são praticamente as mesmas de outras culturas: água, fertilizantes, solo descompactado, uso de defensivos agrícolas para controle de ervas daninhas, fungos, bactérias, insetos e nematóides. E o Brasil tem se

preocupado com a obtenção de novas variedades de cana-de-açúcar, que sejam mais produtivas e mais resistentes.

Segundo MANGELSDORF (1966), as variedades comerciais têm ciclos de cultivo bem definidos, sendo que após este período começam a demonstrar sinais de degeneração. Esta é acompanhada de significativas perdas em produtividade agrícola e, por este motivo, precisam ser gradativamente substituídas por novos materiais mais estáveis e geneticamente superiores.

Por degenerescência ou por necessidade de aumento de produtividade, a busca de novas variedades conduz a uma verdadeira evolução no cultivo da cana-de-açúcar. O Estado de São Paulo é um dos melhores exemplos de ganho de produtividade devido substituição de variedades em declínio (NUNES JUNIOR, 1987). Condições como o clima e o solo são fatores importantes para serem levados em conta na escolha da variedade. Programas de melhoramento têm sido criados e novas variedades cada vez mais produtivas estão aparecendo, variedades com maior potencial de sacarose, resistentes às principais doenças e adaptadas às atuais condições de manejo.

2.1.4 Estágio de corte

A cana-de-açúcar para produção de álcool e açúcar é cultivada, em média, por quatro a cinco cortes. Assim, a cana soca pode representar cerca de 85% da área cultivada.

O sistema radicular da cana-de-açúcar pode continuar ativo por um longo período de tempo depois do corte da planta, deixando de funcionar gradualmente, à medida que um sistema novo se forma, ao crescerem os perfilhos da soqueira (HUMBERT, 1974).

Num censo varietal realizado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) (2004), para uma área de aproximadamente 4 milhões de hectares cultivados com cana-de-açúcar no Brasil, mostrou que existe uma relação entre o estágio de corte e a produtividade da cana-de-açúcar (Tabela 2.1). Tal produtividade foi calculada utilizando as médias dos cortes das safras desde 1998 até 2003. Por fim, foi constatado que a produtividade da cana-de-açúcar tende a diminuir com o aumento do número de cortes.

Tabela 2.1: Produtividade média da cana-de-açúcar para diferentes estágios de corte, para os anos safras de 1998 até 2003.

Corte	Produtividade média (t ha ⁻¹)
1º - cana de ano	79
1º - cana de ano e meio	110
2º - 1ª soca	89
3º - 2ª soca	78
4º - 3ª soca	71
5º - 4ª soca	68
Outros cortes	68

Fonte: CTC (2004).

2.1.5 Época de plantio

RICAUD e COCHRAN (1980) afirmam que a data de plantio exerce influência significativa na produtividade da cana-de-açúcar.

O clima do Estado de São Paulo permite o plantio da cana-de-açúcar num amplo período do ano. Normalmente, são recomendadas duas épocas de plantio. Uma menos ampla, no início da primavera, e outra, mais longa, no verão, quando as condições de temperatura e umidade são favoráveis à boa e rápida emergência dos colmos (MARCHIORI, 2004).

BARBIERE e VILLA NOVA (1977) descrevem que o plantio da cana-de-açúcar na região Centro-Sul é feito em duas épocas, conhecidas como “plantio de cana de ano” e “plantio de cana de ano e meio”. O plantio feito em setembro-outubro permite a colheita da cana-de-açúcar com aproximadamente 11 a 14 meses, e é conhecida como “cana de ano”. O plantio feito em janeiro-março permite a colheita da cana-de-açúcar com aproximadamente 15 a 20 meses, e é conhecida como “cana de ano e meio” (Figura 2.1).

EPOCA DAS OPERAÇÕES AGRÍCOLAS PARA A CANA-DE-ÁÇUCAR

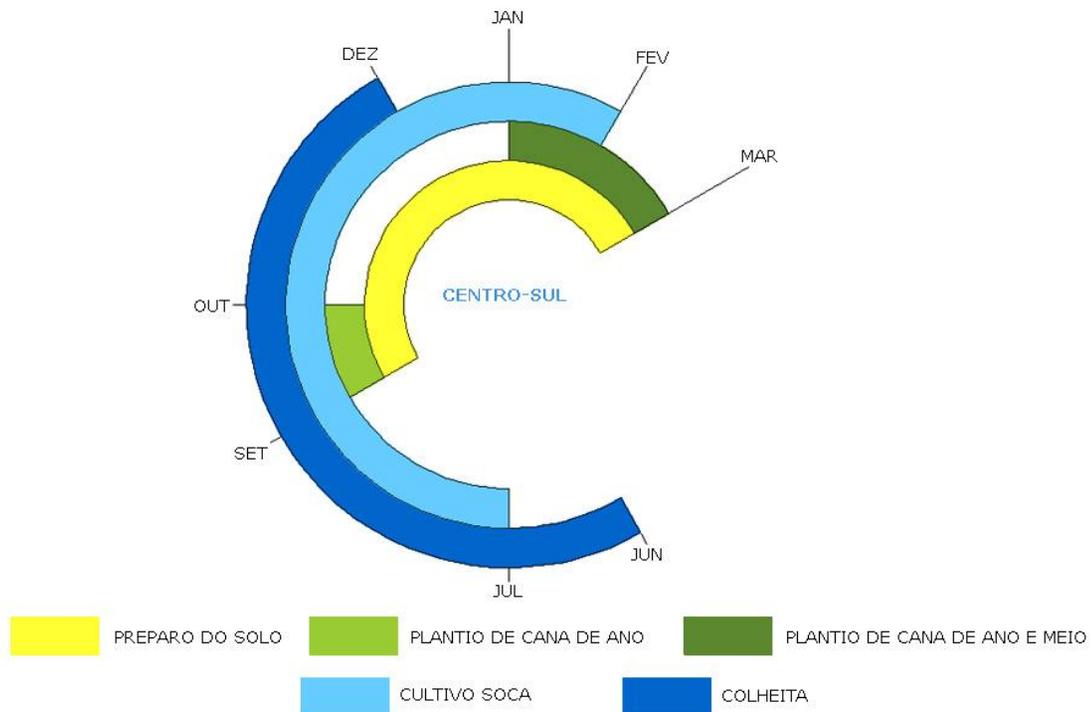


Figura 2.1: Época das operações agrícolas para a cana-de-açúcar na região Centro-Sul.

Fonte: MARCHIORI, 2004.

A cana de ano, plantada em setembro-outubro tem seu máximo de desenvolvimento de novembro a abril, diminuindo em seguida, devido às condições climáticas adversas ao crescimento, podendo ser colhida, dependendo da variedade, a partir de julho. A cana de ano e meio, plantada em janeiro-março, tem um crescimento inicial no primeiro período chuvoso (fevereiro a abril), mas desencadeia um acelerado crescimento no segundo período chuvoso (outubro a abril) e embora não seja colhida no ano safra em que foi plantada ela tem quase o dobro da produtividade da cana de ano (CASTRO, 1999).

A influência da água para a cana-de-açúcar é grande, principalmente na fase de desenvolvimento vegetativo da cultura, que pode chegar a um período de nove meses no ano. Se nesta fase de desenvolvimento a escassez de água for grande pode ocorrer queda significativa na produtividade da cana-de-açúcar. Geralmente essa fase vai de novembro a abril, para a cana de ano e cana soca, e de setembro a abril para a cana de ano e meio (ALFONSI et al., 1987). Porém, devido à diferença entre os tipos de solos, a produtividade é

menos afetada por déficits hídricos em solos argilosos do que em solos arenosos devido à diferença na capacidade de retenção de água destes solos.

2.2 Sensoriamento remoto aplicado à cultura da cana-de-açúcar

A cultura da cana-de-açúcar vem sendo estudada nos últimos anos utilizando o sensoriamento remoto como uma eficiente ferramenta de análise dos dados. Porém na grande maioria dos estudos utilizam-se apenas dados ópticos.

O conhecimento sobre comportamento espectral da cana-de-açúcar pode auxiliar na estimativa da produtividade e alguns trabalhos mostraram que índices de vegetação possuem boa relação com a produtividade agrícola (RUDORFF, 1985; RUDORFF e BATISTA, 1990 e 1991; RUDORFF et al., 1995; LAMPARELLI et al., 2003; BERKA et al., 2003; RIZZI, 2004; PICOLI et al., 2009). Esses índices de vegetação (IV) são indicadores da presença e condição da vegetação, e até hoje são frequentemente utilizados como variáveis auxiliares para estimar a produtividade de culturas agrícolas. Os IV também têm a finalidade de destacar a contribuição espectral da vegetação minimizando a influência de fatores como solo, ângulo solar, vegetação senescente, atmosfera, e inclinação do terreno (GUTMAN et al., 1995 e ALMEIDA et al. 2005). Porém, os efeitos da visada fora do nadir produzem diferenças significativas no cálculo do NDVI, como concluiu GALVÃO et al. (2001).

Atualmente há um grande projeto, o CANASAT, que é realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em conjunto com a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (UNICA), o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/USP) e o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), que foi iniciado em 2003. Este projeto utiliza imagens de sensores ópticos para estimar a área plantada e para fazer o mapeamento da cana-de-açúcar em classes: soca, reformada, expansão, em reforma (RUDORFF et al., 2004).

Outros estudos foram realizados com o objetivo de discriminar variedades de cana-de-açúcar utilizando dados hiperespectrais e multiespectrais (GALVÃO et al., 2005; TISOT et al., 2007). Estes estudos mostraram que a acurácia das classificações é superior quando se utilizam dados hiperespectrais. Porém, sabe-se que tais dados possuem limitações no que se refere à: observação noturna, penetração através de nuvens e da chuva, e até na discriminação de algumas feições do tipo umidade do solo e rugosidade. É por não apresentarem essas limitações que os sensores SAR possuem grande potencial para utilização no monitoramento

agrícola. Porém, ainda são poucos os estudos sobre o comportamento da cana-de-açúcar na região das microondas.

YUN et al. (1995) além de observarem um padrão homogêneo do coeficiente de retroespalhamento (σ°) dentro de uma mesma variedade de cana-de-açúcar, os autores ainda notaram que quase não há variações de σ° nas polarizações HH, HV e VV, nas bandas C e X, devido a cultura da cana-de-açúcar ter um comportamento isotrópico, pois seu dossel possui orientação aleatória.

SIMÕES (1999), trabalhando com dados SAR na banda C com polarização HH, dividiu os talhões de cana-de-açúcar em duas classes: variedades com arquitetura planófila, e variedades com arquitetura erectófila, mas ainda assim não foi possível explicar alguns comportamentos observados. O autor analisou os valores de σ° de duas variedades: uma com porte ereto e folhas finas (SP71-1406) e outra com porte planófilo e folhas largas (RB72-454). A variedade SP71-1406, por possuir dossel heterogêneo, obteve maior retroespalhamento múltiplo ($\sigma^\circ > -9$ db), e a variedade RB72-454, por possuir estrutura planófila e folhas largas, obteve uma redução no coeficiente de retroespalhamento (-10 db $< \sigma^\circ < -9$ db). Esses resultados mostram que as imagens SAR são sensíveis a mudanças na estrutura da cultura (biomassa), indicando a possibilidade de distinguir diferentes estágios fenológicos.

BAGHDADI et al. (2009) observaram que para identificar mudanças na altura da cultura em estágio inicial (altura menor que 100 – 150 cm) o ideal é utilizar altos ângulos de incidência e menor comprimento de onda. Os autores concluíram, também, que nas bandas C e L, os campos arados e os com cana-de-açúcar possuem respostas parecidas. A explicação está na semelhança de rugosidade. Ambos possuem alta rugosidade, o que aproxima as respostas espectrais. Na banda X isso não ocorre, pois esta é menos sensível a rugosidade do solo.

Outros estudos analisaram a possibilidade da utilização de sinergismo entre dados SAR e ópticos. O trabalho de SANO et al. (2005) para discriminar fitofisionomias do cerrado brasileiro utilizando: banda L (polarização HH), índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) e índice de realce da vegetação (EVI - *Enhanced Vegetation Index*) mostraram que o sensor SAR possuía maior potencial para discriminar fitofisionomias do cerrado quando comparado com os índices de vegetação, porém esses índices eram mais sensíveis a variações sazonais. Ao testarem a combinação multitemporal dos dados SAR, NDVI e EVI constataram que houve aumento na capacidade de

discriminação de tipos de vegetação do cerrado, concluindo que o sinergismo entre os dados pode aumentar a capacidade de discriminação de alvos.

CLEVERS e LEEUWEN (1996) também observaram que há melhora na estimativa da produtividade de beterrabas quando se utiliza: dados SAR banda C com polarização VV, dados SAR banda L com polarização HH e dados ópticos para estimar o valor do índice de área foliar (IAF). Este trabalho além de comprovar o grande potencial do sinergismo entre os dados (SAR e óptico) mostrou a grande vantagem em inserir o dado SAR em um modelo de estimativa de produtividade.

2.3 Parâmetros que interferem no imageamento de radar

O coeficiente de retroespalhamento (σ°) é o único parâmetro do radar que é relacionado ao alvo. E, pelo fato das microondas apresentar alta interação com os objetos, existem alguns fatores predominantes relacionado ao alvo que regem o valor do coeficiente de retroespalhamento (ULABY et al., 1984):

- A constante dielétrica do alvo: é influenciada pelo teor de umidade. Para culturas agrícolas a umidade da planta está relacionada com as folhas do dossel, troncos e frutos, e isso varia com o estágio fenológico. Portanto, a constante dielétrica varia conforme o desenvolvimento da planta;
- A forma, o tamanho e a orientação dos elementos difusores do dossel (folhas, frutos, galhos, flores e tronco);
- A rugosidade e constante dielétrica do material que recobre o solo;
- A geometria dos difusores (direção das linhas de plantio, espaçamento, percentagem de cobertura (porte da planta), altura das plantas, largura da folha, hábito de crescimento, etc.).

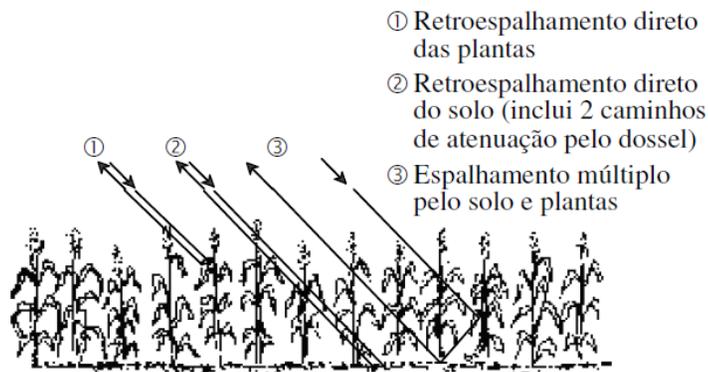


Figura 2.2: Contribuições no retroespalhamento agrícola.

Fonte: Adaptado de ULABY et al. (1984).

Outros fatores são relativos ao sensor:

- Freqüência da onda incidente;
- Direção da onda incidente: definida pelo o ângulo de incidência e pelo ângulo azimutal relativo à direção de visada;
- Direção de polarização das antenas de transmissão e recepção.

2.3.1 Parâmetros relacionados aos alvos

Constante dielétrica do alvo

A constante dielétrica da água é maior do que a do solo e a da vegetação seca na faixa das microondas. Portanto, variações na umidade da vegetação e dos solos causam variações nas propriedades dielétricas destes alvos, por conseguinte no valor do σ° (BRAKKE et al., 1981). Há um aumento no valor de σ° conforme aumenta a umidade do solo, tanto para solos sem vegetação como para solos vegetados (ULABY et al., 1978). Para solos sem vegetação a relação entre σ° e a umidade do solo é quase linear.

Em estudos feitos em áreas vegetadas apontam um aumento no valor de σ° de dosséis com presença de água livre (BRISCO et al., 1989). Portanto, a cultura na fase de maturação (umidade interna baixa) tem uma queda no valor de σ° , pelo fato de ter um aumento na penetração da radiação eletromagnética das microondas no dossel. E isso faz com que o solo contribua para o valor do σ° (BRISCO e BROWN, 1997).

Para culturas do tipo gramíneas, como a cana-de-açúcar, cujo dossel permite armazenar água após precipitação ou irrigação, o valor de σ° pode ajudar a melhorar a separabilidade de tais culturas (FREITAS et al., 2007).

Forma, tamanho e orientação dos elementos difusores

A resposta espectral das culturas depende, também, do comprimento de onda/frequência, pois comprimento de onda maior do que o tamanho do alvo gera um espalhamento difuso e, em alvos maiores um espalhamento especular (DOBSON et al., 1995).

Culturas com estrutura vertical predominantemente (ereta), por exemplo: cana-de-açúcar, milho, sorgo, etc., absorvem mais ondas polarizadas verticalmente (VV) do que horizontalmente (HH), o que gera uma diminuição na resposta espectral do alvo (ULABY et al., 1982; DOBSON et al., 1995).

No estudo feito por BAGHDADI et al. (2009) utilizando diferentes comprimentos de ondas, banda X, C e L, para estudar a relação entre a altura da cultura de cana-de-açúcar com o valor de σ° , concluíram que, para comprimentos de ondas menores (por ex. banda X) e para ângulos de incidência maiores o coeficiente de retroespalhamento é mais sensível para mudanças na altura da cultura de cana-de-açúcar em estágio inicial (alturas menores que 100-150 cm).

Rugosidade

A rugosidade é um fator de grande importância, pois exerce forte influência na resposta de um alvo. Esse parâmetro pode ser estimado pelo desvio padrão da altura média (altura RMS – *Root Mean Square*). Uma superfície rugosa possui um espalhamento difuso da energia, portanto, se mostra com alto brilho nas imagens SAR. Já uma superfície lisa comporta-se ao contrário, possui espalhamento especular da energia e mostra-se com baixo brilho.

Em um estudo feito por ULABY et al. (1978), os autores apresentaram a relação entre o ângulo de incidência (α) e o σ° . No nadir ($\alpha = 0$) o valor de σ° diminui com o aumento da rugosidade, isso ocorre principalmente em baixas frequências. Para um ângulo de incidência de 10° o valor σ° é quase independente da rugosidade. Já para o ângulo de incidência de 20°

há uma alta correlação entre o valor de σ° e a rugosidade, o aumento da rugosidade do alvo resulta no aumento do coeficiente de retroespalhamento.

Propriedades Geométricas

Segundo DOBSON et al. (1995) a geometria do alvo define a direção do espaço tridimensional em que ocorre o espalhamento. As linhas de plantio são fatores que podem influenciar no valor de σ° . SCHOTTEN et al. (1995) concluiu que dependendo da direção de visada do sensor há variação na resposta de σ° . E que, em culturas onde o dossel é homogêneo as linhas de plantio não são perceptíveis.

Outro fator importante é a biomassa, que é sensível a frequências menores, como banda C e L, para as culturas de: canola, cevada e trigo (BRISCO et al., 1992). Em outro estudo, FERRAZZOLI et al. (1997) correlacionou dados SAR, banda C e polarização HV, com biomassa. Os autores observaram que existem culturas em que a biomassa possui uma correlação maior com o valor de σ° , são elas: trigo, alfafa e colza (variedade de couve).

2.4 Banda L

O sensor utilizado neste trabalho, o PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) a bordo do satélite ALOS da Agência Espacial Japonesa (JAXA), foi escolhido, pois opera na banda L (23,6 cm) e possui multi-polarização (HH, VV, HV e VH), com variação do ângulo de incidência entre 18° a 48°, larguras de faixas imageadas de 40 a 360 km e resoluções nominais de 7 a 100 m, dependendo do modo de aquisição.

A banda L é a mais indicada para este trabalho, pois possui alta correlação com dados de biomassa de culturas agrícolas (BRISCO et al., 1992; PAMPALONI et al., 1997), porém seu uso ainda é pouco explorado. SILVA et al. (2009), trabalhando com dados simulados do MAPSAR, nas culturas de algodão, café e pastagem, constatou que a polarização HV foi a melhor encontrada para distinguir campos de pastagens. À medida que se considera mais de uma polarização a distinção de alvos aumenta. Ao se utilizar VV e HV foi possível separar café de pastagem, e, HH e HV foi ideal para separar diferentes campos de pastagens. A combinação de VV, HV e HH foi a mais efetiva na separação das culturas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo abrange as lavouras de cana-de-açúcar localizadas na região nordeste do Estado de São Paulo e é delimitada pelas coordenadas 20°46' e 21°50' de latitude sul e 47°16' e 48°14' de longitude oeste, Figura 3.1.



Figura 3.1: Área de estudo.

A região possui clima tipicamente tropical, onde os meses de janeiro a março são chuvosos (precipitação média de 30 anos (1971 -2000): 607 mm), sendo os meses de janeiro e fevereiro os mais quentes (temperatura média de 30 anos (1971 -2000): 24,3°C); os meses de julho a setembro são mais secos (precipitação média: 118,2 mm) sendo o mês de junho o mais frio (temperatura média de 30 anos (1971 -2000): 18,6°C) (UNESP, 2011). A altitude do local varia de 500 m a 800 m e a declividade de 0 a 8% (plano a suavemente ondulado) (OLIVEIRA et al., 1999). Os latossolos são os solos predominantes na área (MARTORANO et al., 1999).

3.2 Materiais

3.2.1 Dados espectrais

As imagens do sensor PALSAR foram adquiridas pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), processadas pela *Alaska Satellite Facility* (ASF) no nível 1.5R e a ortorretificação foi realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através de software de processamento de imagens, com base nas informações obtidas pelo sensor, sem o uso de pontos de controle, assim como sua distribuição. Esses dados estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Característica do sensor PALSAR a bordo do satélite ALOS.

Imageamento	Frequência	Ângulo de visada	Polarização	Resolução espacial	Resolução radiométrica	Área Imageada
Fine - single			HH ou VV	7 - 44 m		
Fine - dual	1270 MHz	8° - 60°	HH+HV ou VV+VH	14 - 88 m	5 bits	40 - 70 km
ScanSAR	(Banda L)	18° - 43°	HH ou VV	100 m		250 - 350 km
Polarimetric		8° - 30°	HH+HV+V H+VV	24 - 89 m	3 a 5 bits	20 - 65 km

*Revisita: 46 dias.

Fonte: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>

Devido à limitação de imagens da área de estudo, neste trabalho foram utilizadas as polarizações HH e HV, imageadas em órbita ascendente com um ângulo de inclinação de 38°. A resolução espacial da imagem polarizada HH (*Fine Beam Single Polarisation* - FBS) é 6,25 metros, e da multi-polarizada HH e HV (*Fine Beam Dual Polarisation* - FBD) é 12,5 metros.

As imagens dos sensores PALSAR foram adquiridas nas datas apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Data de aquisição das imagens do sensor PALSAR a bordo do satélite ALOS.

Data	PALSAR	
	Fine Beam Single Polarisation (FBS)	Fine Beam Dual Polarisation (FBD)
19/02/2007	█	
22/08/2007		█
07/10/2007		█
22/02/2008	█	
08/04/2008	█	
24/05/2008		█
24/08/2008		█
09/10/2008		█
24/02/2009	█	
27/08/2009		█

Fonte: <http://www.ibge.gov.br/alos/>

3.2.1 Dados cana-de-açúcar

A Usina possui 24 diferentes variedades de cana-de-açúcar plantada em toda sua extensão. Porém, para este estudo, foram selecionadas as três variedades mais representativas da área de trabalho. São elas:

A variedade RB85-5156 que possui elevado touceiramento, principalmente na soca, colmos eretos, mas decumbentes na fase adulta, diâmetro fino a médio, cor verde-clara e presença de rachaduras e muita palha. Ela apresenta ainda ótima capacidade de brotação de soqueiras e alta precocidade (Tabela 3.3). A variedade RB92-5345 caracteriza-se pelo desenvolvimento rápido, hábito de crescimento ereto, difícil despalha, diâmetro de colmo médio, coloração roxo-amarelada quando exposta ao Sol e presença destacada de cera e gema ovalada. Possui ainda alto teor de sacarose, alta produtividade e alto teor de fibra no início de safra. A variedade RB86-7515 apresenta alta velocidade de crescimento, porte alto, hábito de crescimento ereto, alta densidade de colmo, cor verde arroxeado que se acentua quando exposta ao Sol e fácil despalha. Ela é tolerante à seca, possui boa brotação de soqueira, mesmo colhida crua, alto teor de sacarose, crescimento rápido e alta produtividade (HOFFMANN et al., 2008).

Tabela 3.3: Características agronômicas das variedades de cana-de-açúcar RB85-5156, RB92-5345 e RB86-7515 consideradas nesse estudo.

Característica	Variedade		
	RB85-5156	RB92-5345	RB86-7515
Produção	média	alta	alta
Brotação soca	ótima	boa	boa
Velocidade de crescimento	regular	rápida	rápida
Perfilhamento soca	médio	médio	médio
Maturação	precoce	média	tardia
Exigência em ambientes*	baixa/média	média/alta	baixa
Fechamento entre linhas	bom	bom	bom
Tombamento	eventual	freqüente	eventual
Densidade de colmo	fino/médio	médio	alto
Colheita	abril-maio	maio-jul	jul-set

Fonte: HOFFMANN et al. (2008).

*Ambiente de produção é o espaço físico que considera o tipo de solo, as condições de clima e as características da planta que em conjunto maximizem a sua produtividade. Variam de A a E, do melhor ao pior ambiente, respectivamente (PRADO et al., 1998).

É possível verificar a diferença no porte dessas três variedades nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 e o comportamento do perfilhamento de cada uma. A Figura 3.2 apresenta a variedade RB85-5156 com idade de 4 meses, a Figura 3.3 a variedade RB92-5345 com idade de 2 meses e a Figura 3.4 a variedade RB86-7515 com idade de 2 meses também. É possível verificar que as três variedades não possuem diferença na altura da planta, quando ainda estão na fase de perfilhamento e passando por um período de seca, porém é possível notar a diferença no perfilhamento das plantas. Em ordem crescente temos a variedade RB85-5156 com maior número de perfilhos, a variedade RB92-5345 intermediária e a variedade RB86-7515 com menos perfilhos.



Figura 3.2: Variedade RB85-5156 com idade de 4 meses. Data da foto: 09/09/2010.



Figura 3.3: Variedade RB92-5345 com idade de 2 meses (+ perfilhoss que a 7515, menos perf. que a 5156). Data das fotos: 09/09/2010.



Figura 3.4: Variedade RB86-7515 com idade de 2 meses (+- 60 cm). Data das fotos: 09/09/2010.

Já na fase adulta as variedades RB92-5345 e RB86-7515 são semelhantes por possuírem folhas eretas, mas com diferença na altura da planta de aproximadamente 0,5 metros a mais na variedade RB92-5345 (Figura 3.5).



(a)

(b)

Figura 3.4: (a) Variedade RB92-5345 com idade de 13 meses (b) variedade RB86-7515 com idade de 12 meses. Data das fotos: 09/09/2010.

O manejo da cana-de-açúcar, na área estudada, é realizado da seguinte maneira: após a colheita, realizada mecanicamente, o solo fica coberto pela palha da cana-de-açúcar (camada com cerca de 10 cm de altura) (Figura 3.5). Depois de alguns dias (~ 7 dias), uma nova operação retira a palha da linha de plantio e enleira essa palha entre as linhas e ao mesmo tempo paralela a elas. Esta operação provoca uma sucessão de pequenos morros, de aproximadamente 15 a 20 cm de altura, gerando um aumento da rugosidade do terreno (Figura 3.6). Mesmo após um mês depois da operação de enleiramento da palha, ainda é possível verificar, em campo, esses pequenos morros de palha (Figura 3.7). Já a condição de solo exposto acontece em duas situações: quando o talhão de cana-de-açúcar está em reforma ou quando a cana foi colhida manualmente. No período relativo a este trabalho, os valores de σ° corresponderam à condição de reforma. A retirada das touceiras foi seguida por uma operação com grade niveladora, que, ao mesmo tempo em que nivela o terreno, provoca destorroamento

do solo, diminuindo a rugosidade e, conseqüentemente, diminuindo o valor do retroespalhamento.

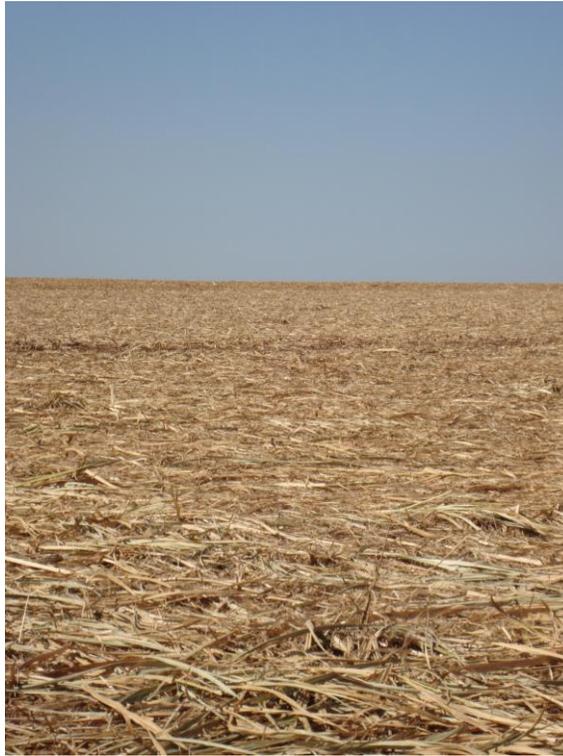


Figura 3.5: Cana-de-açúcar colhida há poucas horas. Data da foto: 09/09/2010.



Figura 3.6: Palha enleirada. Fotografia tirada após 3 dias a máquina ter enleirado a palha. Data da foto: 14/05/2010.



Figura 3.7: Variedade RB86-7515 com idade de 1 mês. Data da foto: 09/09/2010.

3.3 Método

3.3.1 Processamento das imagens

A etapa de pré-processamento das imagens PALSAR envolve a correção radiométrica e geométrica.

A correção radiométrica envolveu a conversão dos níveis digitais em amplitude para coeficientes de retroespalhamento (σ° , unidade em decibel (dB)). Para isto, foi utilizada a equação encontrada em SHIMADA et al. (2009) (Equação 3.1). Segundo AMARAL & SHIMABUKURO (1997), esta calibração permite compreender melhor o processo de retroespalhamento dos alvos e, conseqüentemente, comparar imagens de datas e passagens distintas.

$$\sigma^\circ = 10 * \log (DN^2) + CF \quad (3.1)$$

Sendo, DN corresponde ao valor referente ao nível digital da imagem amplitude; e CF corresponde ao fator de correção cujos valores são encontrados em AUIG (2009).

A correção geométrica das imagens PALSAR foi feita com base na imagem ortorretificada (*geocover*) do Landsat ETM+ de 23 de março de 2001, disponível no endereço eletrônico da Universidade de Maryland, Estados Unidos (<http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>), utilizando pontos de controle e projetadas para o sistema de projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator), datum WGS84 e fuso 23S.

3.3.2 Análise estatística

Os valores de σ° referentes à cana-de-açúcar foram analisados calculando-se a média do talhão das três variedades (RB85-5156, RB92-5345 e RB86-7515), de acordo com o estágio de corte. Para comparar se houve diferenças nos valores de σ° da cana-de-açúcar nos diferentes estágios de cortes, foi calculado o teste z com 5% de significância.

Para melhor entendimento do comportamento temporal do σ° , foi calculado e analisado o balanço hídrico (decendial), adotando-se o método de THORNTHWAITE & MATHER (1955), com capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, dado este fornecido pela Usina Bonfim. A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948). Foi utilizado também o *Standardized Precipitation Index* (SPI) (MCKEE et al., 1993), cedido pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). O SPI é um

indicador de seca padronizado no espaço e no tempo. Maiores detalhes podem ser encontrados em GUTTMAN (1998) e GUTTMAN (1999). Dados de precipitação da área de estudo foram levantados através de estações meteorológicas da região e fornecidos pela Usina Bonfim.

Valores de σ° de outros alvos (mata, solo exposto e solo coberto por palha seca) também foram analisados por fazer parte do processo de manejo da cultura na área de estudo.

Com a finalidade de verificar diferenças estatísticas dos valores médios de σ° provenientes de talhões com diferentes variedades de cana-de-açúcar, foi feita análise descritiva dos dados e aplicado o teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO & WILK, 1965) para verificar a normalidade dos dados. Em seguida aplicou o teste não paramétrico de Mann-Whitney (MANN & WHITNEY, 1947) e correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904). Optou-se por utilizar o coeficiente de correlação de Spearman porque o número de talhões de cana-de-açúcar era pequeno. O aspecto temporal da resposta da cultura em termos de retrospalhamento ao longo do ciclo vegetativo também foi analisado. Das imagens FBD, foram geradas duas imagens razão (HH/HV e HV/HH), as quais fizeram parte das análises.

Para verificar a possível influência da linha de plantio nas imagens PALSAR um conjunto de 20 talhões foram classificados como sendo paralelo ou perpendicular à direção de visada do sensor (Figura 3.8). Esta classificação foi baseada em curvas de nível, com cinco metros de equidistância, da área de estudo (escala 1:10.000) fornecidas pela Raízen, uma imagem ALOS AVNIR (com resolução espacial de dez metros) de 8 de fevereiro de 2008 e uma imagem QuickBird, disponível no programa Google Earth™ (de abril de 2008). A diferença entre as datas das imagens PALSAR, AVNIR e QuickBird foram considerados insignificantes pois os talhões de cana-de-açúcar foram plantados em 2004 e permaneceu no campo por pelo menos cinco anos.

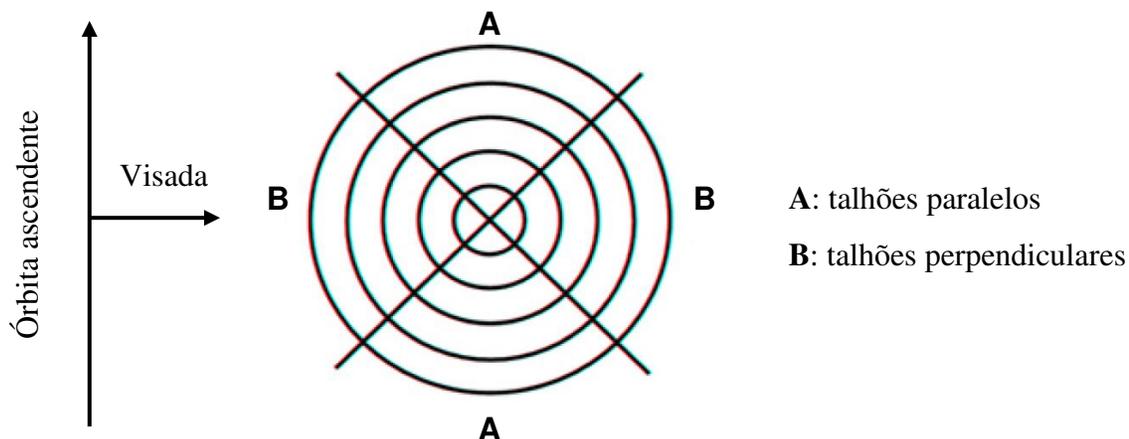


Figura 3.8: Diagrama usado para classificar os talhões como sendo paralelos ou perpendiculares à passagem do sensor.

Fonte: adaptado de SILVA et al. (2009).

A média dos valores de σ° foi calculada para os talhões cultivados em linhas paralelas e perpendiculares. O balanço hídrico foi utilizado para apoiar a análise dos dados SAR, uma vez que o balanço hídrico está diretamente relacionado a umidade do solo e é um dos parâmetros de superfície que mais influencia a intensidade da energia retroespalhada. Os valores médios de σ° dos talhões, plantados em linhas perpendiculares e paralelas em relação à direção da visada de sensor, foram analisados estatisticamente utilizando o teste de Shapiro-Wilk e o teste não-paramétrico de Mann-Whitney com nível de significância de 5%.

Para estimar a produtividade agrícola das lavouras de cana-de-açúcar foram gerados quatro modelos de regressão linear múltiplos, um para cada safra (2007/08, 2008/09 e 2009/10) e um para as três safras juntas. O modelo de estimativa de produtividade agrícola de cana-de-açúcar foi composto pelas variáveis: imagem PALSAR do mês de fevereiro (daquela safra), variedade da cana-de-açúcar, ambiente de produção, estágio de corte, data de colheita e a produtividade do talhão na safra anterior.

A variável variedade da cana-de-açúcar considerou três classes: RB85-5156, RB92-5345 e RB86-7515; a variável ambiente de produção levou em conta cinco classe: as quais variaram do ambiente B (segundo melhor ambiente, só perde para o ambiente A) ao ambiente E (pior ambiente) e a variável estágio de corte quatro classes: 2º corte ao 5º corte. Estas variáveis qualitativas foram transformadas em variáveis *dummy* e então foi aplicada a técnica de “*Best Subsets*” (NETER et al., 1996), que identifica o melhor subconjunto de preditores

dentro do conjunto inicialmente especificado para estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar por talhão. Desta forma foi possível determinar modelos de estimativa com boa qualidade de ajuste e com o menor número possível de preditores, tudo isso baseado nos valores do coeficiente de determinação.

A análise dos resíduos foi realizada para verificar a homocedasticidade, a normalidade e a independência dos resíduos. Foi verificado também se havia presença de multicolinearidade, ou seja, se os preditores eram dependentes linearmente. A presença de *outliers* foi avaliada pelo gráfico dos resíduos.

Após as análises já citadas, foi realizado o cálculo da produtividade agrícola em escala de lavoura (talhão). Os modelos foram avaliados pelos valores de σ^o e pela análise de aproximadamente 20% do total de talhões previamente selecionados aleatoriamente, que não foram incluídos na criação do modelo de estimativa da produtividade agrícola. Para isto, o modelo de estimativa da produtividade foi calculado para esses talhões selecionados. Posteriormente foi realizada uma análise de regressão linear simples entre a produtividade estimada pelo modelo e a produtividade real. O modelo também foi avaliado pelo índice d de Willmott modificado que verifica a concordância entre os dados observados e os estimados (WILLMOTT et al., 1985). Além do índice d, também foram calculados os valores de erro aleatório (EA) e erro padrão (EP) (ALLEN, 1986). O coeficiente de determinação (R^2) indicou a precisão do modelo, ou seja, o quanto a oscilação da variável dependente é explicada pelas variáveis independentes. O p-valor foi utilizado como indicador da significância do modelo ao nível de 5%.

Por fim, o teste t foi calculado (STELL & TORRIE, 1980) para comparar a produtividade estimada pelo modelo, nos dados selecionados, com a produtividade real. Esta avaliação permitiu analisar se existe diferença significativa entre os valores médios de produtividade estimada pelo modelo em relação aos valores médios da produtividade real.

4. MONITORAMENTO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO IMAGENS DO SENSOR PALSAR/ALOS

Michelle Cristina Araújo Picoli, Rubens Augusto Lamparelli, Edson Eyji Sano e Jansle Vieira Rocha.

Resumo – Este trabalho teve como objetivo analisar o potencial das imagens de radar PALSAR/ALOS no monitoramento da cultura de cana-de-açúcar e verificar a capacidade do sensor em discriminar diferença na biomassa de três variedades de cana-de-açúcar nos seus diferentes estágios vegetativos em um ano agrícola. Valores digitais de quatro datas diferentes (fevereiro, maio, agosto e outubro de 2008), correspondentes à amplitude, foram convertidos para coeficientes de retroespalhamento (σ°). Posteriormente as imagens foram registradas utilizando pontos de controle. A utilização, simultânea ou não, de imagens obtidas em duas polarizações (HH e HV), foi capaz de discriminar a diferença na biomassa das três variedades consideradas, com p-valores significativos ao nível de 5% de significância. Foi também capaz de distinguir talhões colhidos manualmente dos colhidos mecanicamente.

Palavras-chave: *Saccharum spp.*, SAR, biomassa, fases fenológicas.

Abstract – This study had as main objective to verify the potential of the utilization of PALSAR/ALOS images in sugarcane crop monitoring and verify the sensor's ability to discriminate differences in the biomass of three sugarcane varieties in different phenological stages in a crop year. The digital values acquired from four different dates (february, may, august and october 2008) were transformed from amplitude to backscatter (σ°). Further the images were registered using control points. The use of different polarization, HH and HV isolated or not, allowed distinguish the differences in the biomass among the three varieties considered, according to p values at 5% of significance. It was also able to distinguish the plots were manual harvested to the mechanically harvested.

Keywords: *Saccharum spp.*, SAR data, biomass, phenological phases.

4.1 Introdução

Grande parte das pesquisas realizadas, até o momento, para compreender o comportamento espectral da cana-de-açúcar vem utilizando dados multiespectrais e hiperespectrais na faixa óptica do espectro eletromagnético (SIMÕES et al., 2005; FORTES & DEMATTÊ, 2006; GALVÃO et al., 2006). No Estado de São Paulo, os meses de janeiro e

fevereiro são os mais favoráveis para a coleta de dados de sensoriamento remoto sobre cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) (PICOLI et al., 2009; RUDORFF et al., 2010). Fevereiro é o melhor mês para relacionar a resposta espectral da cana-de-açúcar com o peso dos colmos, que está diretamente ligado à produtividade agrícola da planta. Porém, fevereiro é também caracterizado pelo elevado volume de precipitação. No referido Estado, entre os meses de janeiro a março a precipitação média de 30 anos (1971 -2000) foi de 607 mm (UNESP, 2011), o que gera dificuldade na aquisição de imagens ópticas de satélite, livres de cobertura de nuvens.

O uso de dados provenientes de sensores de radar de abertura sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*) para o monitoramento de culturas de cana-de-açúcar pode ser promissor, principalmente pela capacidade de obtenção de dados remotos independentemente das condições do tempo, bem como o uso de radiação eletromagnética com diferentes polarizações ajudam a potencializar a capacidade de discriminação de alvos (MCNAIRN & BRISCO, 2004; PARADELLA et al., 2005; BAGHDADI et al., 2010).

BAGHDADI et al. (2009), estudando plantios de cana-de-açúcar da Ilha Réunion, próxima a Madagascar, verificaram que dados de radar na banda L (comprimento de onda de ~ 23 cm) e polarizações HH e HV apresentaram alta correlação com a altura da cana-de-açúcar (0 - 150 cm). Os autores obtiveram ainda forte correlação entre coeficientes de retroespalhamento na polarização HH (σ°_{HH}) e NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) derivados de diferentes estágios de crescimento, maturação e corte. Na fase de maturação, os valores de σ° apresentaram uma forte queda por causa da diminuição no conteúdo de água nas plantas.

LIN et al. (2009), estudando a cultura de cana-de-açúcar da Província de Guangdong, China, observaram que, na banda C (comprimento de onda de ~ 5 cm), as polarizações HH e HV eram sensíveis aos componentes verticais e horizontais da planta, principalmente folhas e caules. Os autores observaram alta correlação entre índice de área foliar (IAF) e retroespalhamento, este último proveniente da razão de polarização HV/HH. Isso ocorreu porque a polarização HV normalmente apresenta valores baixos de retroespalhamento nos estágios iniciais do ciclo fenológico e aumenta com o aparecimento de mais folhas. Com o crescimento da planta, as estruturas: vertical (caule) e horizontal (folhas) da planta, variam com o aumento do IAF. Este processo gera variações no retroespalhamento das polarizações

HH e HV ao longo do ciclo da cultura. A variação é maior na polarização HV em função da sua maior sensibilidade ao aumento do retroespalhamento volumétrico no dossel da cultura. Os autores frisaram ainda a importância em analisar imagens relacionadas com as fases de plantio e maturação. Nessas fases, o retroespalhamento da cultura da cana-de-açúcar (7 a 11 dB) costuma ser bem mais distinto do retroespalhamento proveniente dos demais alvos adjacentes com valores inferiores a 4 dB.

Outros estudos têm enfatizado a utilização da banda L por causa da elevada relação dos valores de retroespalhamento com a biomassa da planta (BRISCO et al., 1992; PAMPALONI et al., 1997; BAGHDADI et al., 2009). PALOSCIA (1998), ao comparar valores de σ° das bandas C, L e P (comprimento de onda de ~ 70 cm) para estimar IAF de trigo, milho e alfafa, concluiu que, na banda L, houve maior quantidade de informação, principalmente na polarização HV.

Este trabalho teve como objetivo analisar o potencial das imagens de radar PALSAR/ALOS (banda L, polarizações HH e HV) no monitoramento da cultura de cana-de-açúcar e verificar a capacidade do sensor em discriminar diferença na biomassa de três variedades de cana-de-açúcar nos seus diferentes estágios vegetativos em um ano agrícola.

4.2 Materiais e Métodos

A área de estudo abrange as lavouras de cana-de-açúcar localizadas na região nordeste do Estado de São Paulo e é delimitada pelas coordenadas 20°46' e 21°50' de latitude sul e 47°16' e 48°14' de longitude oeste. A região possui clima tipicamente tropical, onde os meses de janeiro a março são chuvosos (precipitação média de 30 anos (1971 -2000): 607 mm), sendo os meses de janeiro e fevereiro os mais quentes (temperatura média de 30 anos (1971 -2000): 24,3°C); os meses de julho a setembro são mais secos (precipitação média: 118,2 mm) sendo o mês de junho o mais frio (temperatura média de 30 anos (1971 -2000): 18,6°C) (UNESP, 2011). A altitude do local varia de 500 m a 800 m, a declividade varia de 0 a 8% (plano a suavemente ondulado) (OLIVEIRA et al., 1999). Os latossolos são os solos predominantes na área (MARTORANO et al., 1999).

Os valores de σ° referentes à cana-de-açúcar foram analisados calculando-se a média do talhão, de acordo com a variedade e estágio de corte. Nesta análise a direção das linhas de plantio não foi considerada. As variedades foram divididas em precoce (RB85-5156, colhida

no início da safra: abril – maio), média (RB92-5345, colhida na metade da safra: maio – julho) e tardia (RB86-7515, colhida no final da safra: julho – setembro) (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Características agronômicas das variedades de cana-de-açúcar RB85-5156, RB92-5345 e RB86-7515 consideradas nesse estudo.

Característica	Variedade		
	RB85-5156	RB92-5345	RB86-7515
Produção	média	alta	alta
Brotação soca	ótima	boa	boa
Velocidade de crescimento	regular	rápida	rápida
Perfilhamento soca	médio	médio	médio
Maturação	precoce	média	tardia
Exigência em ambientes*	baixa/média	média/alta	baixa
Fechamento entre linhas	bom	bom	bom
Tombamento	eventual	frequente	eventual
Densidade de colmo	fino/médio	médio	alto
Colheita	abril-maio	maio-jul	jul-set

Fonte: HOFFMANN et al. (2008).

*Ambiente de produção é o espaço físico que considera o tipo de solo, as condições de clima e as características da planta que em conjunto maximizem a sua produtividade. Variam de A a E, do melhor ao pior ambiente, respectivamente (PRADO et al., 1998).

A variedade RB85-5156 possui elevado touceiramento, principalmente na soca, colmos eretos, mas decumbentes na fase adulta, diâmetro fino a médio, cor verde-clara e presença de rachaduras e muita palha. Ela apresenta ainda ótima capacidade de brotação de soqueiras e alta precocidade (HOFFMANN et al., 2008). A variedade RB86-7515 apresenta alta velocidade de crescimento, porte alto, hábito de crescimento ereto, alta densidade de colmo, cor verde arroxeado que se acentua quando expostos e fácil despalha. Ela é tolerante à seca, possui boa brotação de soqueira, mesmo colhida crua, alto teor de sacarose, crescimento rápido e alta produtividade (HOFFMANN et al., 2008). A variedade RB92-5345 caracteriza-se

pelo desenvolvimento rápido, hábito de crescimento ereto, difícil despalha, diâmetro de colmo médio, coloração roxo-amarelada quando expostos ao Sol, e presença destacada de cera e gema ovalada. Possui ainda alto teor de sacarose, alta produtividade e alto teor de fibra no início de safra (HOFFMANN et al., 2008).

As características das imagens do sensor PALSAR analisadas nesse estudo estão descritas na Tabela 4.2. Estas foram pré-processadas pelas técnicas de correção radiométrica e geométrica. A correção radiométrica envolveu a conversão dos níveis digitais em 16 bits e em amplitude para σ° . Para isto, foi utilizada a equação encontrada em SHIMADA et al. (2009) (Equação 4.1). Segundo AMARAL & SHIMABUKURO (1997), esta calibração permite compreender melhor os processo de retroespalhamento dos alvos e, conseqüentemente, comparar imagens de datas e passagens distintas.

$$\sigma^\circ = 10 * \log (DN^2) + CF \quad (4.1)$$

Sendo, DN corresponde ao valor referente ao nível digital da imagem amplitude; e CF corresponde ao fator de correção cujos valores são encontrados em AUIG (2009).

Tabela 4.2: Características das imagens do sensor PALSAR analisadas nesse estudo.

Data da imagem	Polarização	Ângulo de Incidência	Resolução Espacial (m)	Modo de Imageamento	Número de Visadas
22/02/2008	HH	38°	6,25	FBS	2
24/05/2008	HH+HV	38°	12,5	FBD	4
24/08/2008	HH+HV	38°	12,5	FBD	4
09/10/2008	HH+HV	38°	12,5	FBD	4

FBS = modo de imageamento fino, polarização simples; FBD = modo de imageamento fino, polarização dupla.

A correção geométrica das imagens PALSAR foi feita com base na imagem ortorretificada (*geocover*) do Landsat ETM+ de 23 de março de 2001, disponível no endereço eletrônico da Universidade de Maryland, Estados Unidos (<http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>), utilizando pontos de controle e projetadas

para o sistema de projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator), datum WGS84 e fuso 23S.

Para comparar se houve diferenças nos valores de σ° da cana-de-açúcar nos diferentes estágios de cortes, foi calculado o teste z com 5% de significância.

Para melhor entendimento do comportamento temporal do σ° , foi calculado e analisado o balanço hídrico (decendial), adotando-se o método de THORNTHWAITE & MATHER (1955), com capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm. Este dado foi fornecido pela Usina Bonfim. A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948). Foi utilizado também o *Standardized Precipitation Index* (SPI) (MCKEE et al., 1993). O SPI é um indicador de seca, padronizado no espaço e no tempo. Maiores detalhes podem ser encontrados em GUTTMAN (1998) e GUTTMAN (1999). Este dado, o SPI, foi cedido pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Dados de precipitação da área de estudo foram levantados através de estações meteorológicas da região e fornecidos pela Usina Bonfim.

Valores de σ° de outros alvos (mata, solo exposto e solo coberto por palha seca) também foram analisados por fazer parte do processo de manejo da cultura em estudo.

Com a finalidade de verificar diferenças estatísticas dos valores médios de σ° provenientes de talhões com diferentes variedades de cana-de-açúcar, foi realizada a análise descritiva dos dados. Posteriormente foram aplicados os testes: de Shapiro-Wilk (SHAPIRO & WILK, 1965) para verificar a normalidade dos dados, e o teste não paramétrico de Mann-Whitney (MANN & WHITNEY, 1947) assim como a correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904). Optou-se por utilizar o coeficiente de correlação de Spearman porque o número de dados (talhões de cana-de-açúcar) era pequeno. O aspecto temporal da resposta da cultura em termos de retroespalhamento, ao longo do ciclo vegetativo, também foi analisado. Das imagens FBD, foram geradas duas imagens razão (HH/HV e HV/HH), as quais fizeram parte das análises.

4.3 Resultados e Discussão

As condições meteorológicas da área de estudo nos dois primeiros meses de 2008 foram mais úmidas, acima das normais climatológicas, conforme indicada pelo valor positivo do *Standardized Precipitation Index* – SPI como pode ser observado na Figura 4.1. Em março,

uma condição ligeiramente mais seca foi observada. Neste ano, a condição seca, característica dos meses de maio a setembro para a referida localidade, foi bastante pronunciada. No mês de outubro e, especialmente, em novembro, verificaram-se valores negativos de SPI, indicando quantidade de chuva abaixo da normal e deficiência hídrica. Em outras palavras, houve um atraso na retomada da estação chuvosa, que deveria ocorrer em outubro/novembro e, portanto, um atraso no desenvolvimento da cultura. Em dezembro, observou-se uma condição mais úmida com o início das chuvas.

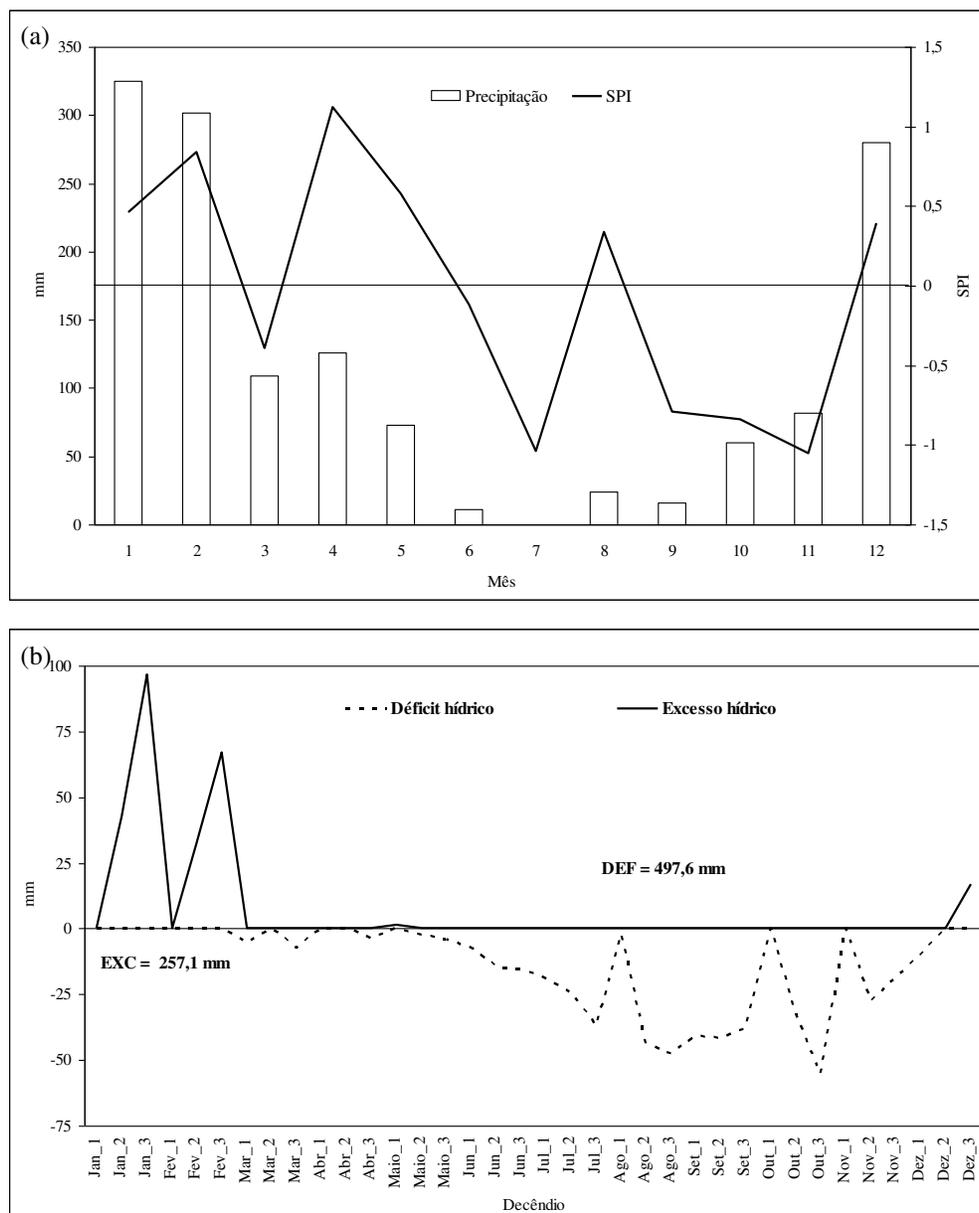


Figura 4.1: Valores de precipitação e *Standardized Precipitation Index* (SPI) (a) e balanço hídrico decendial (b) da área de estudo no ano de 2008.

Os dados de chuva nas datas das imagens PALSAR foram fornecidos pela Usina Bonfim e são apresentados na Tabela 4.3. Pode-se notar que, em 22 de fevereiro, houve uma chuva com intensidade de 4 mm, mantendo-se sem chuva até 9 de outubro.

Tabela 4.3: Precipitação diária e acumulada de três dias na área de estudo e nos dias da passagem do sensor PALSAR.

Data	Precipitação (mm)	Precipitação Acumulada de 3 dias (mm)
22/02/08	4	53
24/05/08	0	0
24/08/08	0	0
09/10/08	0	4

Para verificar se havia diferença no valor médio de σ° referente à cana-de-açúcar com diferentes estágios de cortes, foi calculado o teste z . Ele foi calculado somente para as datas de fevereiro e maio, pois são os meses em que a maioria dos talhões ainda se encontrava com a cultura em campo. A imagem de agosto não foi utilizada, pois só continha nove dados (talhões de cana-de-açúcar), inviabilizando análises deste tipo. Para a imagem de 22 de fevereiro de 2008, o p -valor foi igual a 0,60, e para a de 24 de maio de 2008, o p -valor foi de 0,80. Isto indica que não houve diferença significativa entre as médias dos valores de retroespalhamento da cana-de-açúcar provenientes do terceiro e quarto cortes. Portanto, não houve necessidade em separar a cana-de-açúcar por estágio de corte.

A relação entre σ° da cana-de-açúcar nas polarizações HH e HV é apresentada na Figura 4.2. É possível notar que a variedade RB92-5345 ($n = 10$), que estava com aproximadamente doze meses de idade, ou seja, na fase de maturação, mostrou uma correlação alta ($\rho = 0,976$), enquanto nas outras duas variedades não é observado este comportamento: $\rho = 0,333$ ($n = 10$) para RB86-7515 (seis a sete meses de idade - fase de perfilhamento) e $\rho = 0,543$ ($n = 6$) para RB85-5156 (um mês de idade: fase de brotação e estabelecimento). Isto pode indicar que as polarizações são complementares, conforme indicam estudos realizados por EVANS et al. (1988) e ZEBKER et al. (1991) que apontaram a polarização HV como

confusão de respostas entre as variedades RB86-7515 (idade: sete meses) e RB92-5345 (idade: 12 meses). Isso ocorreu pelo fato das duas variedades estarem com alturas iguais (entre 3 metros e 3,5 metros) e terem dosséis com estruturas predominantemente eretas, separando apenas a variedade RB85-5156, que estava com apenas um mês de idade. Isto nos leva a supor, novamente, que a polarização HV traz mais informações sobre a cultura (espalhamento volumétrico) do que a polarização HH, concordando com as observações obtidas por Paloscia (1998) e Baghdadi et al (2010). Vale ressaltar que a utilização simultânea das polarizações HH e HV indica que é possível o sensor discriminar diferença na biomassa da cana-de-açúcar nos seus diferentes estágios fenológicos.

Quando as variedades são analisadas separadamente, observou-se, pelo comportamento espectral ao longo de um ano, diferenciação entre elas. Analisando a imagem de 24 de maio de 2008, foi possível identificar os talhões da variedade RB85-5156 e diferenciá-los dos restantes, pois já haviam sido colhidos, com isso, apresentaram valores de retroespalhamento mais baixos que as variedades RB92-5345, que estava na fase de maturação, e RB86-7515, que estava no final da fase de crescimento dos colmos (Figura 4.3).

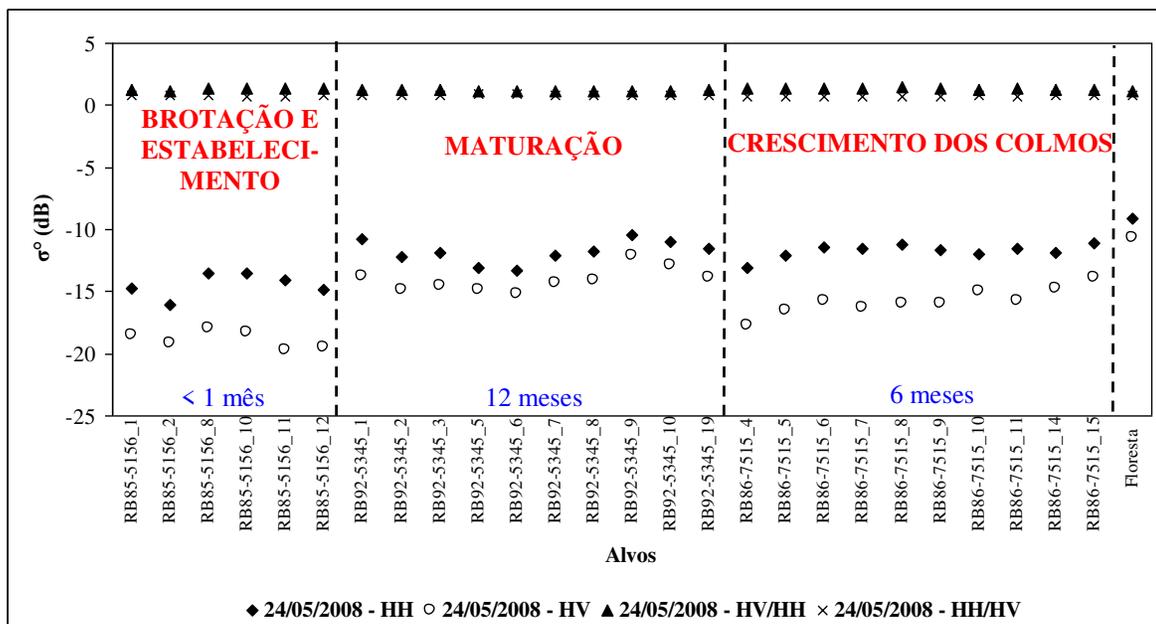


Figura 4.3: Variação dos valores de retroespalhamento das diferentes variedades, em diferentes estágios fenológicos, e de diferentes alvos do sensor PALSAR na data de 24 de maio de 2008.

De acordo com o teste de Mann-Whitney para a polarização HH (Tabela 4.4), para o mês de maio, não foi possível obter diferenciação entre as variedades RB92-5345 e RB86-7515. Já para a polarização HV, essas duas variedades foram diferenciadas, isso pode ter ocorrido devido à polarização HV trazer informação sobre o espalhamento volumétrico, e, em termos de volume a variedade RB92-5345, que estava na fase de maturação, possui mais do que a variedade RB86-7515 que estava na fase de crescimento dos colmos.

Tabela 4.4: Teste de Mann-Whitney para diferentes variedades de cana-de-açúcar.

Comparação	Polarização	p-valor			
		22/02/08	24/05/08	24/08/08	09/10/08
RB85-5156 vs. RB86-7515	HH	0,026*	0,001*	0,003*	0,143
RB85-5156 vs. RB92-5345	HH	0,003*	0,001*	0,786	0,745
RB86-7515 vs. RB92-5345	HH	0,000*	0,821	0,001*	0,121
RB85-5156 vs. RB86-7515	HV	–	0,001*	0,011*	0,020*
RB85-5156 vs. RB92-5345	HV	–	0,001*	0,116	0,303
RB86-7515 vs. RB92-5345	HV	–	0,003*	0,005*	0,050

* Significativo a 5% de probabilidade.

Na cena de 24 de agosto de 2008 (Figura 4.4), verificou-se que as variedades que já haviam sido colhidas, uma em abril/maio (RB85-5156) e a outra em junho (RB92-5345), apresentaram retroespalhamentos semelhantes para as polarizações HH e HV (Tabela 4.4). Como as duas variedades estavam no início da fase de perfilhamento e passando por um período de deficiência hídrica, portanto, não havia água de chuva ou umidade de solo suficiente para influenciar nos processos de retroespalhamento, a única variável que poderia influenciar no retroespalhamento seria o manejo (colheita com descarte da palha) que produziu rugosidade semelhante nas superfícies dos talhões de cana-de-açúcar. Essa rugosidade se manteve devido ao período de estiagem desde a colheita até a data desta imagem, na qual os brotos apresentavam, nesta data, alturas inferiores a 30 cm. Nesta cena, foi possível identificar o único talhão de cana-de-açúcar (4) da variedade RB86-7515 que havia sido colhido em julho (Figura 4.4). Nesta data, pode-se constatar ainda, a diferenciação das variedades RB85-5156 e RB92-5345 da variedade RB86-7515, tanto em HH quanto em HV.

O valor do retroespalhamento para talhões com solo exposto (colheita manual) (Figura 4.4) foi menor que o encontrado para talhões cobertos por palha de cana-de-açúcar (colheita mecânica). Isto pode ser explicado pelo manejo. Após a colheita, realizada mecanicamente, o solo fica coberto pela palha da cana-de-açúcar (camada com cerca de 10 cm de altura). Depois de alguns dias (~ 7 dias), uma nova operação retira a palha da linha de plantio e a enleira paralelamente a elas. Esta operação provoca uma sucessão de pequenos morros, de aproximadamente 15 a 20 cm de altura, gerando um aumento da rugosidade do terreno.

O fato do solo exposto apresentar menores valores de σ° em relação aos da palha, também pode ser explicado pelo manejo. O solo exposto é uma condição que acontece em duas situações: quando o talhão de cana-de-açúcar está em reforma ou quando a cana é colhida manualmente. No período relativo a este trabalho os valores de σ° corresponderam à condição de reforma. A retirada das touceiras foi seguida por uma operação com grade niveladora, que, ao mesmo tempo em que nivela o terreno, provoca destorroamento do solo, diminuindo a rugosidade e, conseqüentemente, diminuindo o valor do retroespalhamento.

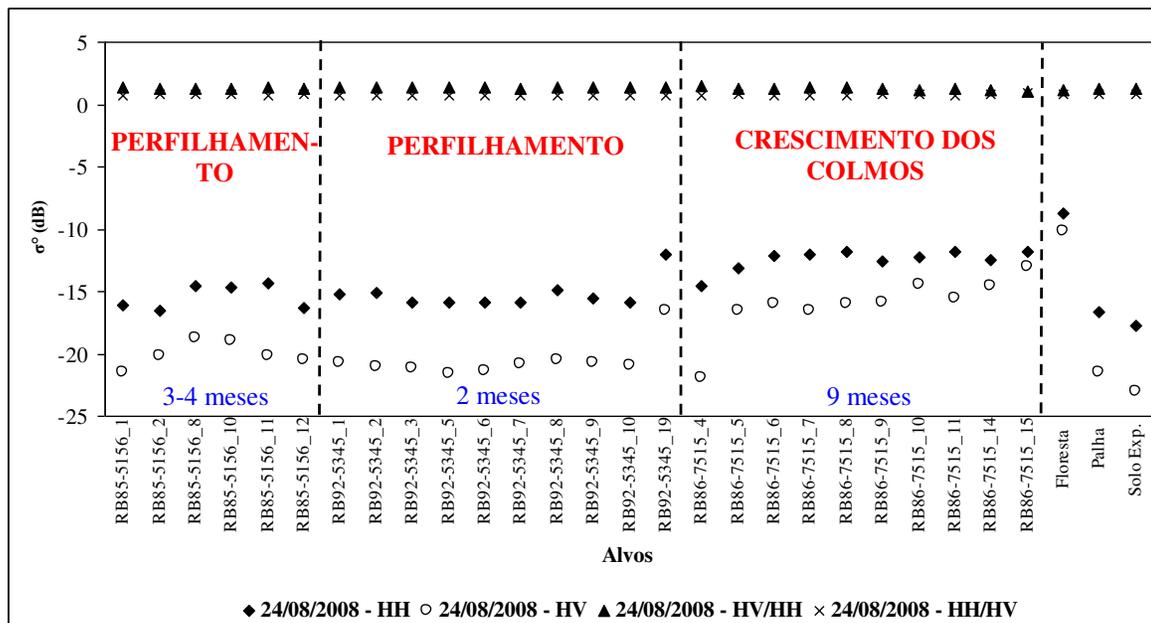


Figura 4.4: Variação dos valores de retroespalhamento das diferentes variedades, em diferentes estágios fenológicos, e de diferentes alvos do sensor PALSAR na data de 24 de agosto de 2008.

Para a cena de 9 de outubro de 2008, não houve diferenciação entre as três variedades na polarização HH (Tabela 4.5), ao nível de 5% de significância. Isso ocorreu pelo fato das variedades RB85-5156 e RB92-5345 estarem na fase de perfilhamento e em condição de deficiência hídrica significativa (Figura 4.1a), isto é, sem um crescimento expressivo, igualando-se em porte à RB86-7515, que foi colhida posteriormente (fase de brotação e estabelecimento), desta forma, determinando, similaridade no retroespalhamento. No mês de outubro, essas três variedades, não se diferenciaram tanto pela altura e sim pela quantidade de perfilhos, sendo que a RB85-5156 tinha maior perfilhamento e a variedade RB86-7515 menor perfilhamento.

Por outro lado, na polarização HV, tanto a variedade RB85-5156 (cinco meses) quanto a RB92-5345 (quatro meses), que estavam na fase de perfilhamento, se diferenciaram da variedade RB86-7515 (1 mês), que estava na fase de brotação e estabelecimento. Isto ocorreu porque as variedades RB85-5156 e RB92-5345 estavam com um tamanho de planta maior e com mais perfilhos do que a RB86-7515. Como a polarização HV traz informações relacionadas com espalhamento volumétrico, era de se esperar que plantas mais desenvolvidas se diferenciasssem das menos desenvolvidas. Mais uma vez, os resultados comprovaram que a polarização HV traz mais informações sobre o alvo em questão.

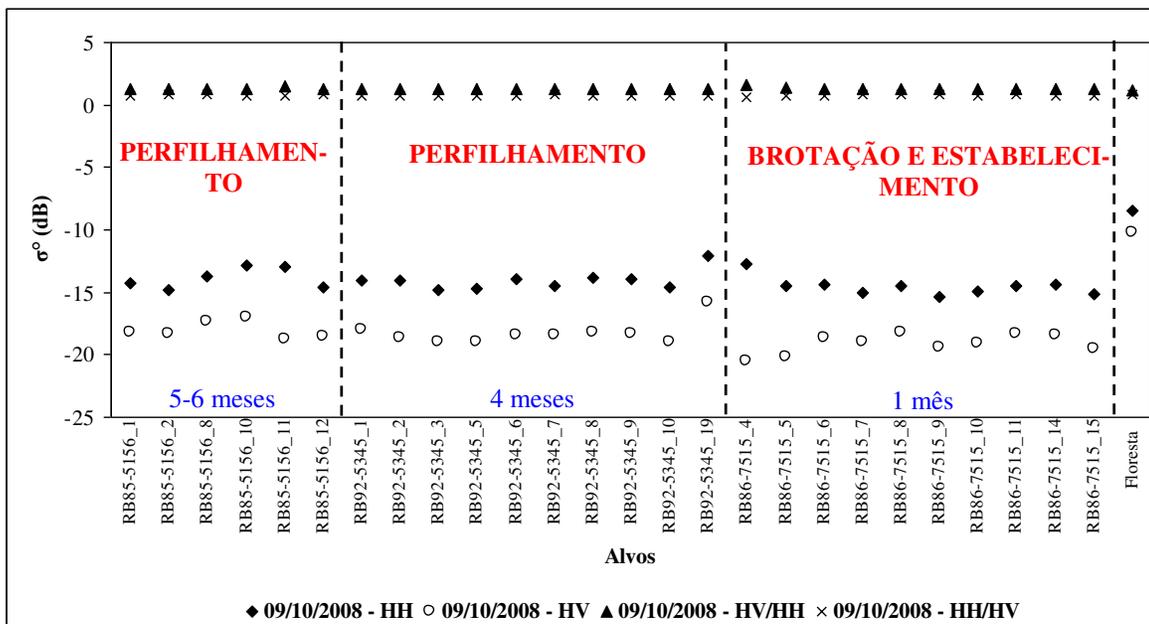


Figura 4.5: Variação dos valores de retroespalhamento das diferentes variedades, em diferentes estágios fenológicos, e de diferentes alvos do sensor PALSAR na data de 09 de outubro de 2008.

Analisando outros alvos da cena foi verificado que, os valores de σ° referentes à mata (Figura 4.6) se mantiveram constantes ao longo do ano, e que os valores da camada de palha da cana-de-açúcar após a colheita é mais alto do que o solo exposto devido a diferenças no manejo, conforme explicado anteriormente.

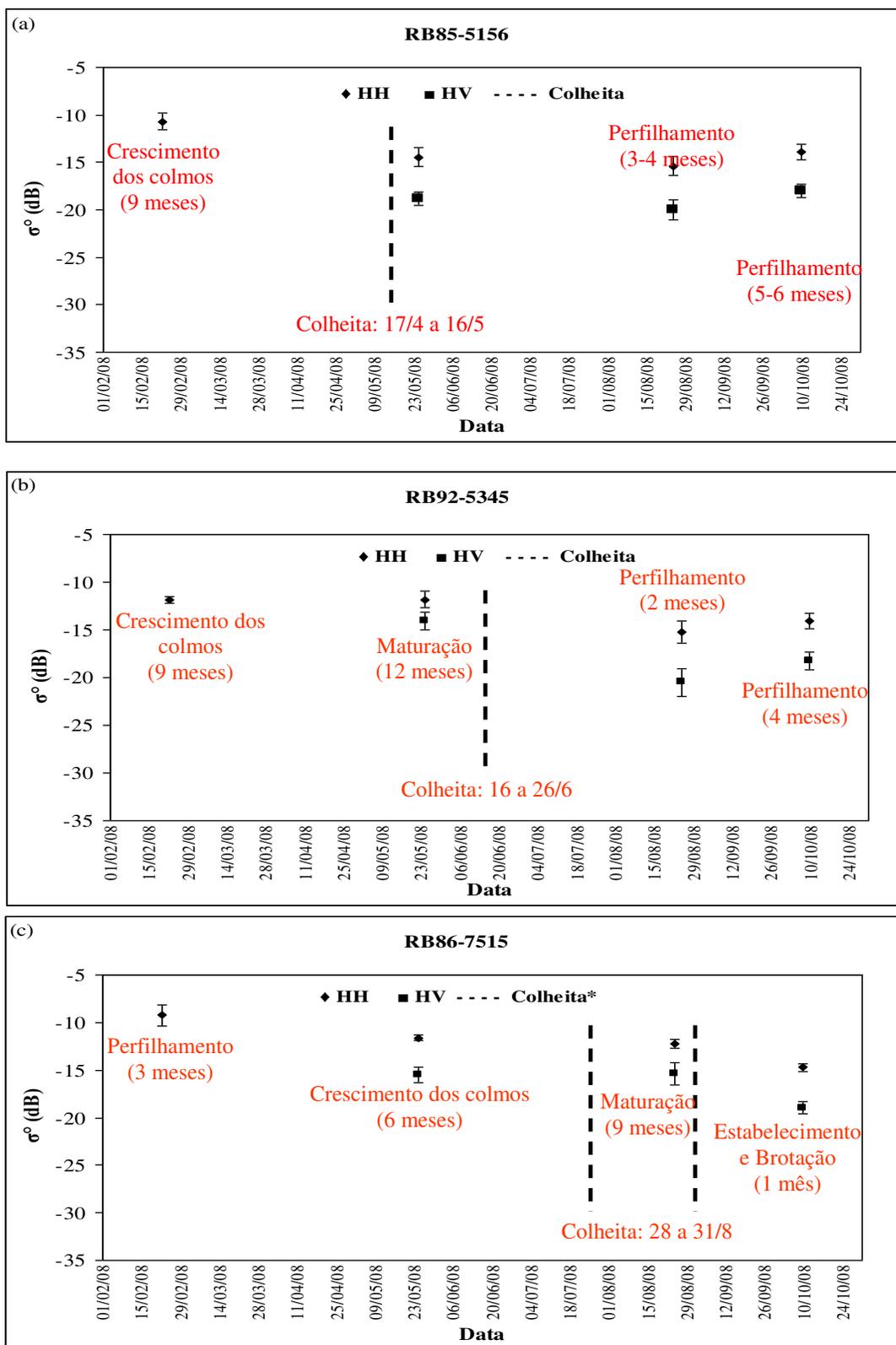


Figura 4.6: Comportamento temporal do retroespalhamento das variedades estudadas RB85-5156 (a), RB92-5345 (b) e RB86-7515 (c) e suas respectivas fases fenológicas.

Tanto a razão $\sigma^{\circ}_{HV}/\sigma^{\circ}_{HH}$ quanto $\sigma^{\circ}_{HH}/\sigma^{\circ}_{HV}$ não trouxeram contribuições relevantes para esse estudo, pois os valores de σ°_{HH} e σ°_{HV} , nas imagens PALSAR apresentaram padrões similares. Quando houve um aumento no valor de σ°_{HH} , ocorreu também um aumento no valor de σ°_{HV} , conforme visto anteriormente. BAGHDADI et al. (2009) também não encontraram relação entre a razão $\sigma^{\circ}_{HH}/\sigma^{\circ}_{HV}$ das imagens PALSAR e o estado da superfície das áreas plantadas com cana-de-açúcar. As fases fenológicas da cultura foram mascaradas e não houve distinção entre a cana-de-açúcar colhida e não colhida. Essas razões podem induzir a diagnósticos incorretos, principalmente quando não se sabe se há realmente cana-de-açúcar plantada.

A variedade RB85-5156, por ser super precoce, foi colhida entre 17 de abril a 16 de maio de 2008 (Figura 4.6a). Assim, em fevereiro, a cana-de-açúcar estava na fase de crescimento dos colmos e, na imagem de 24 de maio, o retroespalhamento foi controlado pela camada de palha que restou da cana-de-açúcar colhida. Como dito anteriormente, essa palha foi enleirada na direção paralela às linhas de plantio, formando um desenho com partes altas e baixas determinando um aspecto rugoso à superfície. Esse aspecto gerou maior rugosidade na imagem do mês de maio, causando assim um aumento no retroespalhamento em relação à resposta da imagem de agosto. Em agosto, a palha, com o passar do tempo, sofreu compactação (acamamento), passando a ter uma espessura menor, em torno de 5 cm, em média, provocando uma suavização da superfície. Este fato provocou um aspecto diferente daquele encontrado no mês de maio. Isto é, mesmo o terreno sendo menos rugoso, o retroespalhamento ainda estava sob influência da palha. Neste momento a cultura estava no início da fase de perfilhamento e passava por um período de seca, apresentando-se ainda muito pequena. Desta maneira os valores de retroespalhamento foram mais baixos nesta data, 29/08/20108, em relação ao mês de maio. Em outubro, a cana-de-açúcar teve um leve crescimento e a contribuição da palha no retroespalhamento da cultura diminuiu.

Na cana-de-açúcar da variedade RB92-5345, a colheita foi realizada entre 10 e 26 de junho. Desta forma, em fevereiro, a cana estava na fase de crescimento dos colmos. Em maio, na fase de maturação. Em agosto, após a colheita, a planta começou a rebrotar, início da fase de perfilhamento, mas com atraso devido à ocorrência de deficiência hídrica nos meses de julho e agosto. Na imagem de outubro, a cana estava maior e na fase de perfilhamento, gerando um retroespalhamento mais alto (Figura 4.6b).

A cana-de-açúcar da variedade RB86-7515 foi colhida entre 28 a 31 de agosto, com exceção de um único talhão de cana-de-açúcar que havia sido colhido em 27 de julho (Figura 4.6c). Portanto, nas imagens de fevereiro, a cultura estava na fase de perfilhamento; em maio, na fase crescimento dos colmos; e, em agosto, na fase de maturação. Por fim, em outubro, a cana estava no início da fase de brotação e estabelecimento dos colmos, com aproximadamente 30 cm de altura. Portanto, o retroespalhamento foi sensível à diferença na biomassa da cultura.

É importante frisar que, para todas as variedades, o comportamento do retroespalhamento, nas polarizações HH e HV, seguiu a mesma tendência. Portanto, a análise acima foi válida para ambas as polarizações.

4.4 Conclusões

Os valores do retroespalhamento apresentaram variações significativas para as diferenças na biomassa das três variedades de cana-de-açúcar nos seus diferentes estágios vegetativos. A polarização HV mostrou-se melhor do que HH na separação dos diferentes estágios fenológicos, portanto, na diferença da biomassa das variedades de cana-de-açúcar estudadas. Deste modo, o uso de sensor na banda L, no caso o PALSAR/ALOS, mostrou-se promissor no monitoramento da cultura de cana-de-açúcar.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Projeto 2008/06043-5) pelo apoio financeiro e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela bolsa de doutorado da primeira autora. À Dra. Laura Hess (Universidade da Califórnia), pelo fornecimento das imagens PALSAR/ALOS. Ao Instituto Agrônomo de Campinas, pelos dados fornecidos. Ao grupo Raízen, pelas sugestões, apoio de campo e fornecimento dos dados.

Referências

AUIG - ALOS User Interface Gateway. PALSAR: **Calibration factor updated**. Disponível em: https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/en/doc/an/20090109en_3.html. Acesso em: 8 jun. 2009.

AMARAL, S.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento Remoto por Radar (SAR): pré-processamento de imagens RADARSAT ("Fine Mode") na região da Floresta Nacional do

Tapajós. In: Proceedings of the Latino-American Seminar On Radar Remote Sensing: Image Processing Techniques, 1., 1997, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: ESA Publications Divisions, p. 37- 42, 1997.

BAGHDADI, N.; BOYER, N.; TODOROFF, P.; HAJJ, M.; BÉGUÉ, A. Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 8, p. 1724-1738, 2009.

BAGHDADI, N.; CRESSON, R.; TODOROFF, P.; MOINET, S. Multitemporal Observations of Sugarcane by TerraSAR-X Images. **Sensors**, v. 10, p. 8899-8919, 2010.

BRISCO, B.; BROWN, R. J.; GAIRNS, J. G.; SNIDER, B. Temporal ground-based scatterometer observations of crops in western Canada. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 1, p. 14-22, 1992.

EVANS, D. L.; FARR T. J.; VAN ZYL J. J.; ZEBKER H. A. Radar polarimetry: analysis tools and applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, p. 774-789, 1988.

FORTES, C., DEMATTÊ, J. A. M. Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 7, p. 1395–1412, 2006.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. The influence of spectral resolution on discriminating Brazilian sugarcane varieties. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 4, p. 769–777, 2006.

GUTTMAN, G. B. Comparing the Palmer Drought Index and the “Standardized Precipitation Index”. **Journal of the American Water Resources**, v. 16, n. 2, p. 113-121, 1998.

GUTTMAN, G. B. Accepting the “Standardized Precipitation Index”: A calculation algorithm. **Journal of the American Water Resources**, v. 35, n. 2, p. 311- 322, 1999.

HOFFMANN, H. P.; SANTOS, E. G. D.; BASSINELLO, A. I.; VIEIRA, M. A. S. **Variedades RB de Cana-de-Açúcar**. Araras: Universidade Federal de São Carlos. Relatório n. 1, 30 p, 2008.

LIN, H.; CHEN, J.; PEI, Z.; ZHANG, S.; HU, X. Monitoring sugarcane growth using ENVISAT ASAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 8, p. 2572-2580, 2009.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, n. 1, p. 50-60, 1947.

MARTORANO, L. G.; ANGELOCCI, L. R.; VETTORAZZI, C. A.; VALENTE, R. O. A. Zoneamento agroecológico para a região de Ribeirão Preto utilizando um sistema de informações geográficas. **Scientia Agrícola**, v. 56, n. 3, p. 739-747, 1999.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: Conference on Applied Climatology, 1993, Anaheim. **Proceedings...** Boston: American Meteorological Society, 1993. p.179-184.

MCNAIRN, H.; BRISCO, B. The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: a review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 525-542, 2004.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo – Legenda Expandida**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1999. 64 p.

PALOSCIA, S. An empirical approach to estimating leaf area index from multifrequency SAR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 2, p. 359-364, 1998.

PAMPALONI, P.; MACELLONI, G.; PALOSCIA, S.; SIGISMONDI, S. The potential of C- and L-band SAR in assessing vegetation biomass: the ERS-1 and JERS-1 experiments. In: ERS Symposium on Space at the service of our Environment, 3., 1997, Florence. **Proceedings...** Noordwijk: European Space Agency - ESA Publications Division, v. 3, p. 1729-1733, 1997.

PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P.; CUNHA, E. S. P. Radars imageadores nas Geociências: estado da arte e perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 1, p. 56-62, 2005.

PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, n. 3, p. 789-795, 2009.

PRADO H.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R.; CAMPANA, M. P.; ZIMBACK, L.; SILVA, M. A. Relation between chemical sub surface conditions of subsoils and sugarcane yield. In: World Soil Science Congress, 16, 1998, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: ISSS, 1998, v. 1, p. 232. Available in: <http://www.iuss.org/images/stories/19th%20WCSS/1998%20-20France/RESUMES%20SUMMARIES%20VOL%20I%20AOUT%201998.pdf>. Acesso em: 05, jul. 2010.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 1, p. 1057-1076, 2010.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR radiometric and geometric calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 12, p. 3915-3932, 2009.

SIMÕES, M. S.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Spectral Variables, Growth Analysis and Yield of Sugarcane. **Science Agricola**, v. 62, n. 3, p. 199-207, 2005.

SPEARMAN, C. The proof and measurement of association between two things. **The American journal of psychology**, v. 15, p. 72-101, 1904.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

UNESP. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO". **Resenha meteorológica do período 1971 – 2000**. Jaboticabal. Disponível em: http://jaguar.fcav.unesp.br/portal_agromet/int_conteudo_sem_img.php?conteudo=180. Acesso em: 20, jan 2011.

ZEBKER H. A.; VAN ZYL J. J.; DURDEN S. L.; NORIKANE L. Calibrated imaging radar polarimetry: Techniques, examples and applications. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, p. 942-961, 1991.

5. DISCRIMINATION OF SUGARCANE'S PLANTING ROW DIRECTION IN THE ALOS/PALSAR SATELLITE IMAGES

Michelle Cristina Araújo Picoli, Rubens Augusto Camargo Lamparelli, Edson Eyji Sano, Jefferson Rodrigo Batista de Mello, Jansle Vieira Rocha

Resumo – Poucos estudos têm sido desenvolvidos para determinar os efeitos das linhas de plantio em culturas de cana-de-açúcar em imagens de radar. Este estudo analisou tais efeitos nas imagens do satélite ALOS PALSAR, obtidas na banda L e polarizações HH e HV. Vinte talhões de cana-de-açúcar do nordeste do Estado de São Paulo foram divididos em duas categorias: linhas de plantio perpendiculares e paralelas à direção de visada do sensor. Valores digitais de amplitude, provenientes de 10 imagens multitemporais obtidas ao longo do ciclo da cultura, foram convertidos em coeficientes de retroespalhamento (σ°). Para a polarização HH, valores médios de σ° provenientes de talhões com linhas de plantio perpendiculares foram mais altos que os de talhões com linhas paralelas (0,7 a 2,3 dB mais altos, 1,2 dB em média), isso pode ter ocorrido devido as linhas de plantio estarem regularmente espaçadas em relação à direção de deslocamento do satélite (range), esse efeito é conhecido como espalhamento de Bragg. Para a polarização HV, não houve diferença estatisticamente significativa. Portanto, imagens PALSAR com polarização HV são mais recomendadas para produzir mapas mais confiáveis de plantio de cana-de-açúcar, para discriminar variedades e para estimar produtividade, dentre outras aplicações. Caso haja necessidade de utilizar imagens com polarização HH, procedimentos efetivos de processamento de imagens para reduzir efeitos de linhas de plantio precisam ser desenvolvidos.

Palavras-chave: radar, sensoriamento remoto, retroespalhamento, polarização.

Abstract – Few studies have been carried out to depict the effects of sugarcane's (*Saccharum* spp.) planting row directions in radar images. This study investigated such effects in the L-band, HH- and HV-polarized, ALOS/PALSAR imageries. Twenty sugarcane fields from northeastern region of São Paulo State, Brazil, were classified into parallel and perpendicular rows to the range direction of the satellite. Digital numbers from ten multitemporal, amplitude images obtained along the crop cycle were converted into backscattering coefficients (σ°). For HH polarization, mean σ° from fields with perpendicular rows were higher than those from parallel rows (0.7 to 2.3 dB higher, 1.2 dB in average), this may have occurred because the

crop rows are evenly spaced in range, this effect is known as Bragg scattering. For HV polarization, there was no statistically significant difference. Therefore, HV-polarized PALSAR images are more recommended to produce improved maps of cultivated areas with sugarcane, to discriminate sugarcane varieties and to estimate productivity, among other applications. If HH-polarized images are intended to be used, an effective image processing procedure needs to be developed to reduce row direction effects in HH-polarized PALSAR scenes.

Keywords: radar, remote sensing, backscattering, polarization.

5.1 Introduction

Although optical remote sensing images are often used for agricultural monitoring (e.g., FORTES & DEMATTÊ, 2006), they present restrictions in regions with persistent cloud cover. Besides, optical data are related only to the top millimeters of canopy and solar illumination and solar azimuth angle effects need to be taken into consideration. An alternative is the use of synthetic aperture radar (SAR) data since they can obtain images of Earth's surface regardless of cloud cover condition (PARADELLA et al., 2005). Another advantage of SAR sensors is the possibility of data acquisition in four different polarization modes (HH, HV, VH, and VV), which allows better target discrimination and image classification (YUN et al., 1995; MCNAIRN & BRISCO, 2004; MCNAIRN et al., 2004).

The spectral signature of sugarcane (*Saccharum spp.*) in the microwave region is still poorly understood due to limited research. One of the exceptions is the work of BAGHDAD et al. (2009), who concluded that data obtained from L-band, HH- and HV-polarized SAR system from areas with sugarcane grown in Reunion Island, east of Madagascar, were highly correlated with height measurements. They also obtained strong correlation between HH-polarized backscatter coefficient (σ°) and normalized difference vegetation index (NDVI) derived from different stages of growth, maturation and harvesting. At the maturation phase, σ° values presented sharp decline because of the decrease in plant water content. LIN et al. (2009), studying sugarcane plantations in Guangdong Province, China, noticed a high correlation between leaf area index (LAI) and C-band, HV/HH ratioed σ° . They pointed out the importance of image analysis from stages of planting with seedlings and maturation. In these phases, σ° from sugarcane fields were quite distinct of σ° derived from surrounding targets.

Other studies have emphasized the use of L-band data because of their high relationship with plant biomass (BRISCO et al., 1992; PAMPALONI et al., 1997; BAGHDADI et al., 2009). PALOSCIA (1998), by analyzing the performance of C-, L-, and P-band σ° values to estimate LAI of wheat, corn, and alfalfa, concluded that the best results were obtained from L-band data, especially in the HV polarization. Significant differences in σ° were reported by PARIS (1983), MORAN et al. (1998) and SILVA et al. (2009) in studies involving croplands and vegetables (soy, corn, cotton, coffee, potato, carrot, beet, onion, and wheat) with different planting row directions. This study aimed to investigate the magnitude of influence of sugarcane planting row directions in the L-band, HH- and HV-polarized ALOS PALSAR imageries.

5.2 Materials and Methods

5.2.1 Study area

The study area corresponded to sugarcane fields found in the northeastern region of São Paulo State, more specifically, in the municipalities of Dobrada and Guariba (between 20° 28' and 21° 38' of south latitude; and between 48° 13' and 48° 22' of west longitude), near the municipalities of Jaboticabal (north) and Araraquara (southeast). The climate is tropical. January to March are the wettest months (30 year average (1971-2000): 607 mm) and January and February are the hottest months (24.3 °C in average (1971-2000)). On the other hand, July to September are the driest months (118.2 mm in average (1971-2000)) and June the coolest month (18.6 °C in average(1971-2000)) (UNESP, 2011). Elevation ranges from 500 m to 800 m, while the slope varies from zero to eight percent (OLIVEIRA et al., 1999). Oxisols are the dominant soil type in the region (MARTORANO et al., 1999).

The study area presents more than 35,000 hectares of sugarcane and 23 varieties with premature (harvesting in april – may), intermediate (harvesting in may – july) and long (harvesting in july – september) growing cycles. Premature varieties can have either 12-month (year sugarcane) or 18-month (year-and-half sugarcane) growing period. After the first harvesting, the cycle becomes 12 months and than it is called ratoon sugarcane or stubble crop. The same crop can be harvested five to seven times (RUDORFF et al., 2010). Appropriated variety is chosen based on local biophysical conditions (soil, climate, and plant

characteristics). According to PRADO et al. (1998) and PRADO (2005), an area for sugarcane cultivation is often classified in five categories, from A (best situation) to E (worst situation).

This research considered only the plots with RB86-7515 variety since it was the most representative in the study site. It presents rapid growing rate, tall canopy, strong upright growing trend, high density of stems, dominant purple-green color, and intermediate growing cycle. It is also drought tolerant and has high saccharose contents and high productivity (HOFFMANN et al., 2008).

5.2.2 Database

Ten ALOS PALSAR images from February, May, August and October of 2007, 2008 and 2009 were acquired for this study (Table 5.1). PALSAR sensor is a L-band SAR with three different observation modes – polarimetric, fine beam, and ScanSAR, with varying viewing angles, spatial resolutions and swath width (Igarash, 2001). The images analyzed in this study presented 1.5G processing level, ascending, fine beam dual (FBD, HH and HV polarizations, pixel size of 12.5 meters) and fine beam single (FBS, HH polarization, pixel size of 6.25 meters) modes. All images were acquired with 38° of incidence angle.

Table 5.1: Characteristics of ALOS PALSAR images analyzed in this research. FBS = fine beam single mode; FBD = fine beam dual mode.

Overpass	Acquisition Mode	Number of Looks
19 feb. 2007	FBS	2
22 aug. 2007	FBD	4
7 oct. 2007	FBD	4
22 feb. 2008	FBS	2
8 apr. 2008	FBS	2
24 may 2008	FBD	4
24 aug. 2008	FBD	4
9 oct. 2008	FBD	4
24 feb. 2009	FBS	2
27 aug. 2009	FBD	4

PALSAR images were preprocessed to correct for radiometric and geometric effects. The radiometric correction involved the conversion of amplitude, digital numbers to backscattering coefficients (σ° , units in decibel (dB)) (SHIMADA et al., 2009) (Equation 5.1). According to ROSENQVIST et al. (2007), this conversion optimizes the analysis of multitemporal radar images from a given site.

$$\sigma^\circ = 10 * \log (DN^2) + CF \quad (5.1)$$

where DN = digital number; CF = calibration factor (Table 5.2).

Table 5.2: Calibration factors of PALSAR images.

Aquisition Mode	Until 8 jan. 2009 (dB)	After 9 jan. 2009 (dB)
FBS HH	-83,4	-83,0
FBD HH	-83,2	-83,0
FBD HV	-80,2	-83,0

Source: AUIG (2009).

The geometric correction of PALSAR images was conducted based on the Landsat ETM+ geocover image acquired on 23 mar. 2001 and available at the website of the University of Maryland, USA (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>). The images were registered to the UTM projection system, WGS84 datum and 23S time zone.

A set of 20 plots were classified as parallel or perpendicular to the sensor look direction (Figure 5.1). This classification was based on the five meters equidistance contour lines of the study area (1:10.000 scale) provided by the Bonfim Mill, an ALOS AVNIR image (spatial resolution of ten meters) from eight feb. 2008 and a QuickBird, optical image available in the Google Earth™ program (overpass: april 2008). Time differences between PALSAR, AVNIR and QuickBird overpasses were considered to be negligible here since sugarcane plots were planted in 2004 and remained in the field for at least five years.

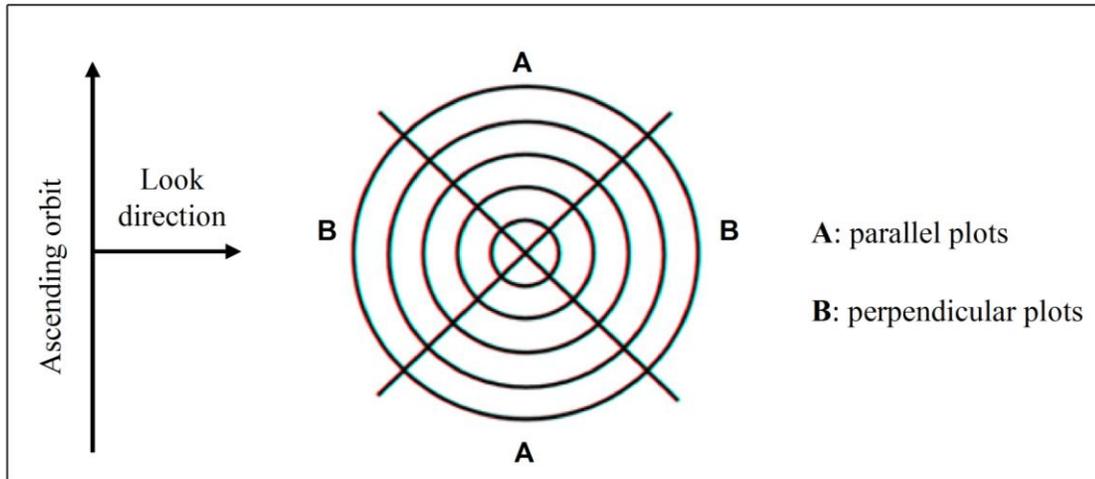


Figure 5.1: Diagram used to classify sugarcane plots into parallel and perpendicular to the sensor's look direction. Source: adapted from SILVA et al. (2009).

Mean σ° values were calculated for the plots planted with parallel and perpendicular rows. To better understand the temporal behavior of backscatter was calculated and analyzed the water balance (ten days), adopting the method of THORNTHWAITE & MATHER (1955), with available water content (AWC) of 100 mm. This data was provided by Bonfim Mill. The potential evapotranspiration (PET) was estimated by the method of Thornthwaite (1948). The water balance is directly related to soil moisture contents and is one of the surface parameters that strongly influence the intensity of backscattered energy. Therefore, the Spearman correlation (SPEARMAN, 1904) between the values of sigma and water balance was calculated. Average σ° values from perpendicular and parallel planting rows relative to the sensor look direction were analyzed statistically using non-parametric, Mann-Whitney test (MANN & WHITNEY, 1947) at significance level of 5%.

5.3 Results and Discussion

Ten plots were classified as having parallel planting rows and ten as having perpendicular rows. The relative distance between planting rows was 1.4 meters at the beginning of the cycle for perpendicular viewing plots. The relative distance between plants in the same line was approximately 0.2 meters at the beginning of the season for parallel viewing plots (Figure 5.2). These distances tend to decrease as sugarcane grows and clump increases.

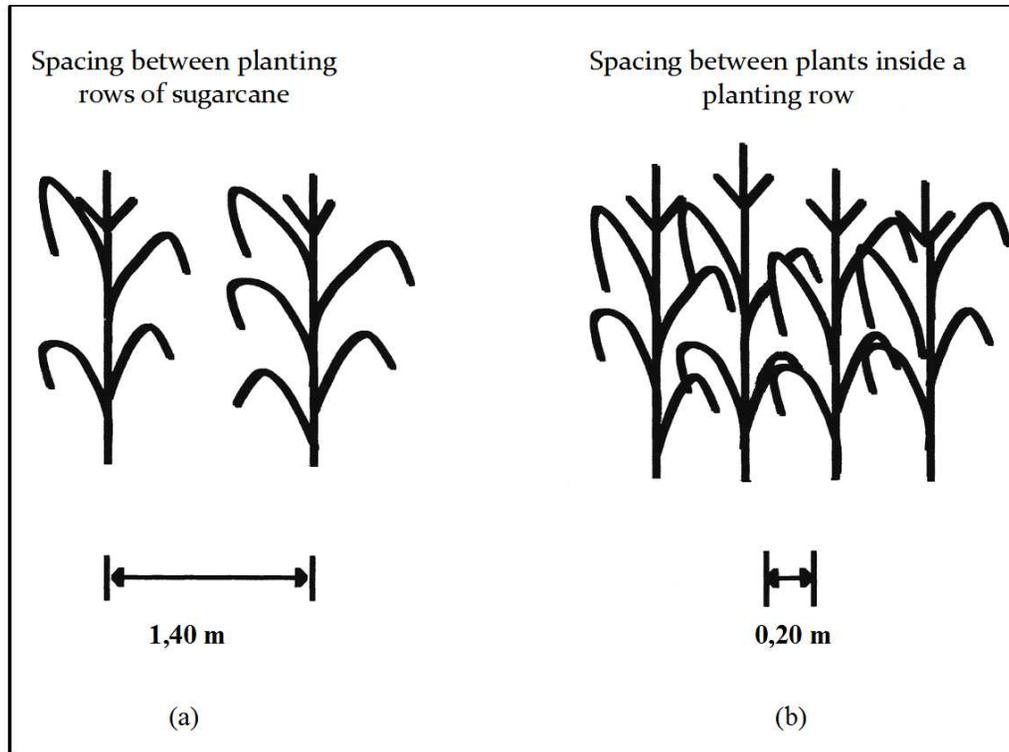


Figure 5.2: Representation of the distance between the planting rows of sugarcane (a) and the distance between plants within a single planting row (b).

For HH polarization, mean σ° values for perpendicular plots were 0.7-2.3 dB higher than those values from parallel plots. For HV polarization, there was no difference in σ° values, at significance level of 5%. WEGMULLER et al. (2011) also noticed that planting row directions found in potato, carrot, beet, onion, and wheat crops presented relevant influence on SAR signals obtained by HH and VV polarizations, but not by HV or VH polarizations. HV-polarized data are more correlated with the leaf area index (LAI) or biomass, as pointed out by PALOSCIA (1998) and SIMÕES et al. (2005).

The mean σ° values for plots planted with parallel and perpendicular rows as well as the water balance and precipitation data are shown in Figure 5.3. We can see that σ° values are directly related to the soil water storage (water balance). In the image acquired in 9 oct. 2008 (ten month), we would expect lower σ° values because of the maturation phase of the plant and dominant dry climate condition at this time of year. However, the accumulated rainfall from day one to eight in this month was relatively high (43 mm). This caused an increased in dielectric constant of the plant, consequently, an increase in σ° values. On the other hand, for

the image acquired in february 2009 (two month), the plots have shown low σ° values because of dry spell event occurred near satellite overpass. These results indicate a strong correlation between the backscatter and water balance (p-value ≤ 0.10).

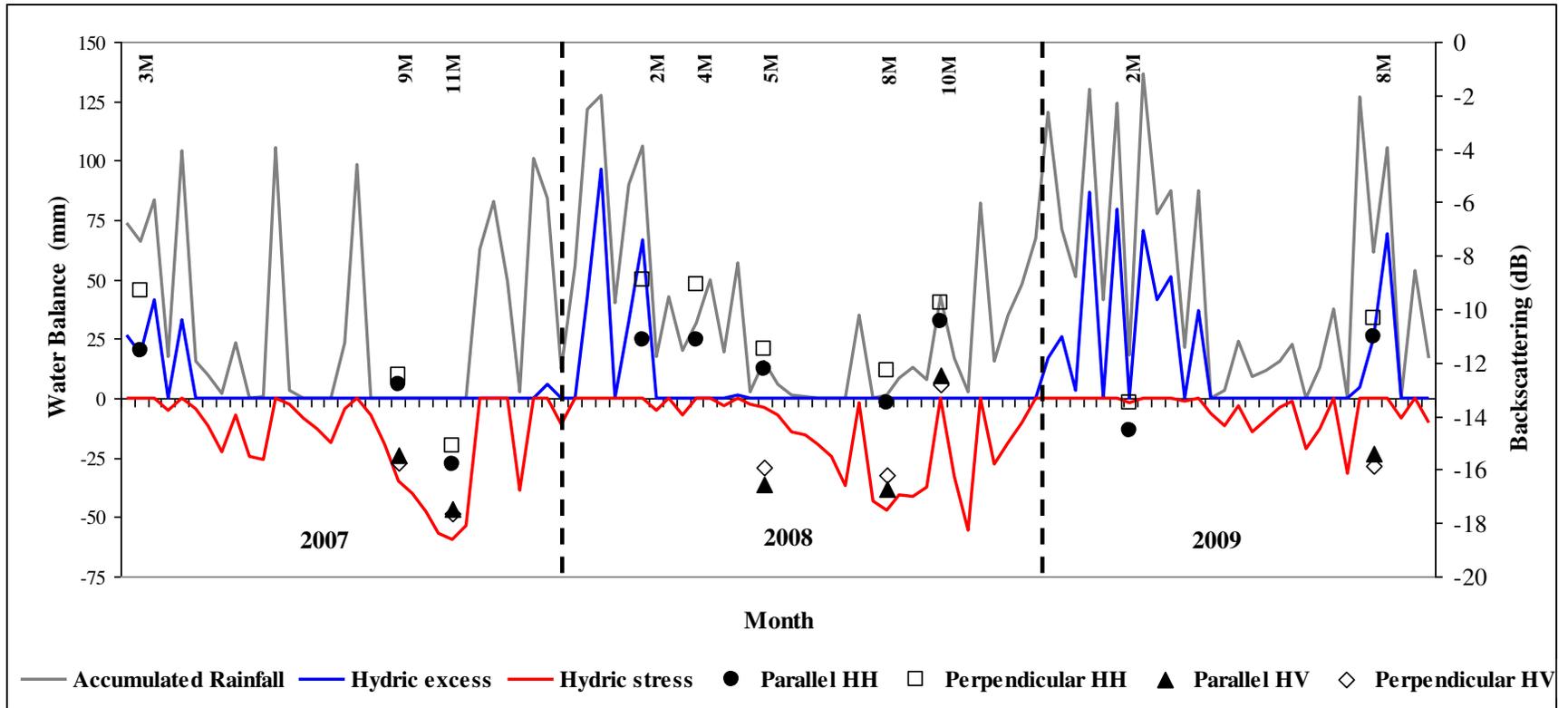


Figure 5.3: Mean σ° from the plots of sugarcane, water balance estimation and rainfall data from the study area. M = month.

Effect of planting rows in HH-polarized PALSAR data was noticeable until eighth month of age (Table 5.3). In the image acquired in october 2008 (ten months of age, average plant height of approximately 3.5 meters), σ° values from parallel plots were similar to those from perpendicular plots, probably because sugarcane was already covering the soil surface completely.

Table 5.3: P-values obtained by the Mann-Whitney test applied to sugarcane's backscattering coefficients grouped into parallel and perpendicular plots to the satellite look direction.

Satellite overpass	Polarization	Age of the plant (Month)	P-value
19 feb 2007	HH	3	0.0002
22 aug. 2007	HH	9	0.5966*
22 aug. 2007	HV	9	0.2121*
7 oct. 2007	HH	11	0.3847*
7 oct. 2007	HV	11	0.3256*
22 feb. 2008	HH	2	0.0013
8 apr. 2008	HH	4	0.0002
24 may 2008	HH	5	0.0376
24 may 2008	HV	5	0.1121*
24 aug. 2008	HH	8	0.0028
24 aug. 2008	HV	8	0.2413*
9 oct. 2008	HH	10	0.0091
9 oct. 2008	HV	10	0.3913*
24 feb. 2009	HH	2	0.0039
27 aug. 2009	HH	8	0.0145
27 aug. 2009	HV	8	0.5636*

* Not significant at 5 %.

Overall, plots with young plants (two or three months of age) were more sensitive to the effect of planting rows because of the plant management characteristics of the area, this difference is possible to be viewed in Figure 5.4, which perpendicular plots lighter than the parallel plots. After mechanical harvesting, straws are left on soil surface (~ 10 cm thickness) to prevent the development of shoots. After about seven days, straws start to clump, forming windrows along planting rows. This type of management leads to a succession of small clumps of about 15-20 cm height aligned along the row direction, increasing the terrain directional roughness (Figure 5.5) and then the relatively high σ° values for the perpendicular plots at this age were found. This may have occurred because of the sugarcane plants are regularly spaced in the range direction and aligned with the wave fronts, then the reflection of each plant will contribute coherently with the reflection of the other scatterers, this phenomenon is known as Bragg scattering. The same finding was also obtained by FORMAGGIO et al. (2001).

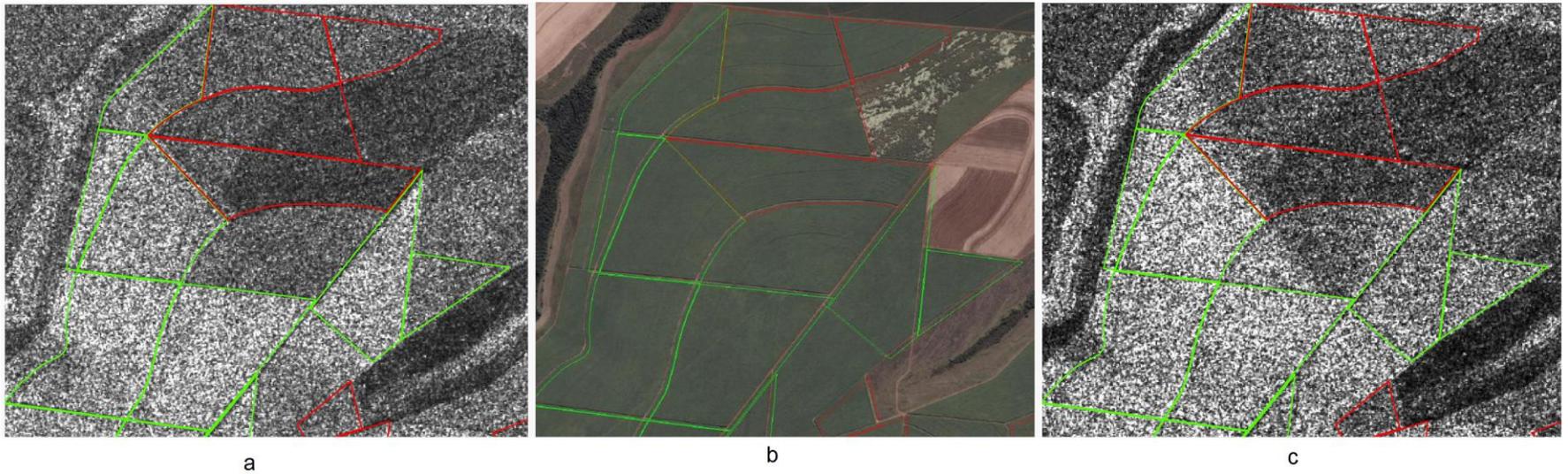


Figure 5.4: PALSAR HH-polarized image from 22 february 2008 (a), QuickBird optical image available in the Google Earth™ program from april 2008 (b) and PALSAR HH-polarized image from 8 april 2008 (c) overpasses. Parallel plots are outlined in red while perpendicular plots are outlined in green.



Figure 5.5: Panoramic field photo obtained in 14 may 2010, illustrating a typical directional terrain roughness found in the study area after sugarcane harvesting.

5.4 Conclusions

Results indicated that, in some cases, there are statistical differences between L-band σ° values which are caused by effects of different planting row directions (parallel and perpendicular to the sensor's look direction). These differences need to be taken into account, for instance, in works aiming to discriminate sugarcane varieties and to estimate sugarcane productivity from SAR data.

HH polarization was more influenced by the planting row direction than HV polarization, mainly for old plants (> eight months of age). In order to obtain more accurate maps of sugarcane plantations or to monitor sugarcane productivity, we recommend to give preference to HV-polarized images. As ongoing research, we recommend to design and validate some specific image processing techniques that have potential to reduce planting row effects in the HH-polarized ALOS PALSAR imageries.

Acknowledgements

The authors would like to thank Fapesp (project number 2008/06043-5) and CNPq for financial supports. Dr. Laura Hess provided PALSAR/ALOS images. Fernando Benvenuti (Raízen) provided useful suggestions and support for field data gathering.

References

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO, Rome. **FAO Irrigation and Drainage**, Paper no. 56, 1998.

AUIG - ALOS USER INTERFACE GATEWAY. PALSAR: **Calibration factor updated**. Available at: https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/en/doc/an/20090109en_3.html. Accessed Jun. 08, 2009.

BAGHDAD, N.; BOYER, N.; TODOROFF, P.; HAJJ, M.; BÉGUÉ, A. Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 8, p. 1724-1738, 2009.

BRISCO, B.; BROWN, R. J.; GAIRNS, J. G.; SNIDER, B. Temporal ground-based scatterometer observations of crops in western Canada. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 1, p. 14-22, 1992.

FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N.; SIMÕES, M. S. Radarsat backscattering from an agricultural scene. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 823-830, 2001.

FORTES, C.; DEMATTÊ, J. A. M. Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, p. 1395-1412, 2006.

HOFFMANN, H. P.; SANTOS, E. G. D.; BASSINELLO, A. I.; VIEIRA, M. A. S. **Varietades RB de cana-de-açúcar**. Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2008. 30 p.

IGARASHI, T. ALOS mission requirement and sensor specifications. **Advances in Space Research**, v. 28, n. 1, p. 127-131, 2001.

LIN, H.; CHEN, J.; PEI, Z.; ZHANG, S.; HU, X. Monitoring sugarcane growth using ENVISAT ASAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 8, p. 2572-2580, 2009.

- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, n. 1, p. 50-60, 1947.
- MARTORANO, L. G.; ANGELOCCI, L. R.; VETTORAZZI, C. A.; VALENTE, R. O. A. Zoneamento agroecológico para a região de Ribeirão Preto utilizando um sistema de informações geográficas. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 3, p. 739-747, 1999.
- MCNAIRN, H.; BRISCO, B. The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: a review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 525-542, 2004.
- MCNAIRN, H.; HOCHHEIM, K.; RABE, N. Applying polarimetric radar imagery for mapping the productivity of wheat crops. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 517-524, 2004.
- MORAN, M. S.; VIDAL, A.; TROUFLEAU, D.; INOUE, Y.; MITCHELL, T. A. Ku- and C-band SAR for discriminating agricultural crop and soil conditions. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 1, p. 265-272, 1998.
- OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo – legenda expandida**. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 1999. 64 p.
- PALOSCIA, S. An empirical approach to estimating leaf area index from multifrequency SAR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 2, p. 359-364, 1998.
- PAMPALONI, P.; MACELLONI, G.; PALOSCIA, S.; SIGISMONDI, S. The potential of C- and L-band SAR in assessing vegetation biomass: the ERS-1 and JERS-1 experiments. In: ERS Symposium on Space at the service of our Environment, 3., 1997, Itália. **Proceedings...** European Space Agency - ESA Publications Division, Noordwijk, v. 3, p. 1729-1733. Available at: <http://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/pampaloni1/>. Accessed Jun. 15, 2009.
- PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P.; CUNHA, E. S. P. Radares imageadores nas Geociências: estado da arte e perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 1, p. 56-62, 2005.

PARIS, J. F. Radar backscattering properties of corn and soybeans at frequencies of 1.6, 4.75 and 13.3 GHz. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-21, n. 3, p. 392-400, 1983.

PRADO, H. **Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil**. Encarte técnico. Informações agronômicas N° 110 – Junho/2005. Available in: [http://www.ipni.net/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/7759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/\\$FILE/Encarte110.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/7759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/$FILE/Encarte110.pdf) [Accessed Feb. 25, 2010].

PRADO H.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R.; CAMPANA, M. P.; ZIMBACK, L.; SILVA, M. A. Relation between chemical sub surface conditions of subsoils and sugarcane yield. In: World Soil Science Congress, 16, 1998, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: ISSS, 1998, v. 1, p. 232. Available in: <http://www.iuss.org/images/stories/19th%20WCSS/1998%20-20France/RESUMES%20SUMMARIES%20VOL%20I%20AOUT%201998.pdf>. Accessed Jul. 05, 2010.

ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M.; ITO, N.; WATANABE, M. Alos Palsar: a pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n.11, p. 3307-3316, 2007.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M. ; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR radiometric and geometric calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 12, p. 3915-3932, 2009.

SILVA, W. F.; RUDORFF, B. F. T.; FORMAGGIO, A.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. Discrimination of agricultural crops in a tropical semi-arid region of Brazil based on L-band polarimetric airborne SAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 5, p. 458-463, 2009.

SIMOES, M. S.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Growth indices and productivity in sugarcane. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 1, p. 23-30, 2005.

SPEARMAN, C. The proof and measurement of association between two things. **The American journal of psychology**, v. 15, p. 72-101, 1904.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

UNESP. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO". **Resenha meteorológica do período 1971 – 2000**. Jaboticabal. Available in: http://jaguar.fcav.unesp.br/portal_agromet/int_conteudo_sem_img.php?conteudo=180. Accessed Jan. 20, 2011.

WEGMÜLLER, U.; SANTORO, M.; MATTIA, F.; BALENZANO, A.; SATALINO, G.; MARZAHN, P.; FISCHER, G.; LUDWIG, R.; FLOURY, N. Progress in the understanding of narrow directional microwave scattering of agricultural fields. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 2423–2433, 2011.

YUN, S.; HUADONG, G.; HAO, L.; JUNFEI, L.; XINQIAO, L. Effect of polarization and frequency using GlobeSAR data vegetation discrimination. **Geocarto International**, v. 10, n. 3, p. 71-78, 1995.

6. O USO DE DADOS PALSAR/ALOS NA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Michelle Cristina Araújo Picoli, Rubens Augusto Lamparelli, Edson Eyji Sano, Jansle Vieira Rocha

Resumo – Alguns modelos já foram desenvolvidos utilizando dados agrometeorológicos e de sensoriamento remoto para estimar produtividade agrícola. Porém, esperam-se novos avanços no uso de imagens orbitais nos modelos de estimativa de produtividade, como a utilização de dados provenientes de sensores de radar de abertura sintética (SAR). O objetivo deste trabalho foi estimar a produtividade agrícola de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) por meio de um modelo de regressão linear múltiplo que utiliza dados de radar do sensor PALSAR/ALOS e dados agronômicos, nas safras 2007/08, 2008/09 e 2009/10. Para avaliar os modelos foram calculados: coeficiente de determinação, teste t, índice d de Willmott, erro aleatório (EA) e o erro padrão (EP). O modelo explicou 79%, 12% e 74% das variações de produtividade observadas nas safras 2007/08, 2008/09 e 2009/10, respectivamente. O modelo da safra 2008/09 foi inferior devido a um longo período de estiagem que ocorreu nessa safra. Quando as três safras são consideradas juntas, o modelo explicou 66%. Este trabalho constatou que os dados PALSAR podem auxiliar e complementar as informações coletadas in loco pelos técnicos da usina para estimar com maior precisão a produtividade de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: radar de abertura sintética, banda L, modelagem, sensoriamento remoto.

Abstract – Some models have been development using agrometeorological and remote sensing data to estimate agriculture yield. However, it is expected that the use of SAR images in yield estimate models can improve it. The main objective of this study was to estimate the sugarcane yield using a multiple linear regression model which considers agronomic and data from PALSAR/ALOS obtained from 2007/08, 2008/09 and 2009/10 crop seasons. To evaluate the models were calculated: coefficient of determination, t-test, Willmott agreement index (d), random error and standard error. The model was able to explain 79%, 12% e 74% of the variation in observed yields in 2007/08, 2008/09 and 2009/10 crop seasons, respectively. The model of the 2008/09 yield was lower because there were long period of drought that occurred this season. When the three seasons were considered together, the model explained 66% of the

variation. Results showed that SAR-based yield prediction models can contribute and assist the sugarmill technicians to improve such estimates.

Keywords: synthetic aperture radar, L-band, modeling, remote sensing.

6.1 Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura de grande importância econômica para o Brasil, pois o país é o maior produtor de açúcar e etanol do mundo e ocupa posição de liderança na tecnologia de sua produção. Ela ocupa aproximadamente 10% do total de terras cultivadas e 1% do total de terras disponíveis para agricultura do país (GOLDEMBERG, 2007) e vem recebendo destaque cada vez maior no cenário mundial por apresentar grande eficiência na produção de biocombustíveis (AGUIAR et al., 2009; MENDONÇA et al., 2011). Desde que o Programa Nacional do Álcool foi implantado no Brasil na década de 1970, a produção de cana-de-açúcar aumentou de 67.759.180 toneladas, em 1970, para 384.165.158 toneladas em 2006 (IBGE, 2010). Essa tendência de aumento ainda se mantém devido à crescente demanda de etanol para abastecimento de automóveis (MORAES, 2011). Só no estado de São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil, de 2003 a 2008, a área plantada aumentou em 1.880.000 hectares (RUDORFF et al., 2010).

Estimativas de produtividade são importantes para o planejamento de atividades do agronegócio no setor sucroalcooleiro e também para o planejamento das operações nas usinas. Em geral, as estimativas de produtividade agrícola das áreas canavieiras de uma usina são feitas antes do início da colheita por técnicos que percorrem os canaviais e observam o desenvolvimento das lavouras, atribuindo a elas valores de produtividade com base na experiência adquirida e em informações de anos anteriores (PICOLI et al., 2009).

Alguns modelos de estimativa de produtividade de cana-de-açúcar foram desenvolvidos utilizando dados agrometeorológicos ou de sensoriamento remoto (e.g., SUGAWARA et al., 2007; PICOLI et al., 2009; SIMÕES et al., 2009; FERNANDES et al.; 2011). Esses modelos utilizam como parâmetros de entrada dados climáticos, agronômicos e de sensoriamento remoto para estimar a produtividade agrícola. Os modelos espectrais têm como base o emprego de variáveis, como índices de vegetação, que são obtidas de imagens de sensoriamento remoto e possuem relação com vigor vegetativo das culturas e, por conseguinte, com a produtividade agrícola.

Novos avanços têm sido alcançados no que se refere ao potencial do uso de imagens orbitais de radar de abertura sintética (SAR) em modelos agronômicos para estimativa de produtividade de culturas agrícolas. LIN et al. (2009) verificaram que havia correlação entre índice de área foliar (IAF) derivados de plantios de cana-de-açúcar, na China, e coeficientes de retroespalhamento (σ°) obtidos na banda C do satélite ENVISAT ASAR. Nesse trabalho, os autores construíram dois modelos empíricos para estimar IAF derivados da razão entre valores de σ° , obtidos nas polarizações HV e HH ($\sigma^\circ_{HV}/\sigma^\circ_{HH}$), encontrando coeficientes de determinação de 0,93 e 0,88 para ambos os modelos.

BAGHDADI et al. (2009) obtiveram coeficiente de determinação de 0,87 entre dados da banda X do satélite TerraSAR-X e o índice de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) dos cultivares de cana-de-açúcar na Ilha Reunião. Esses autores ainda observaram que os valores de retroespalhamento da cana-de-açúcar na banda L e polarizações HH e HV, provenientes do sensor ALOS PALSAR, aumentaram cerca de 4 dB quando os valores de NDVI variaram de 0,2 (canaviais jovens, solo arado e cana colhida) para 0,8 (canaviais em maturação). Assim, esse trabalho teve como objetivo construir um modelo agronômico-espectral que permitisse estimar a produtividade agrícola em talhões de cana-de-açúcar, utilizando dados de radar do sensor PALSAR/ALOS (banda L, polarização HH) e dados agronômicos, nas safras de 2007/08, 2008/09 e 2009/10. As estimativas geradas por este modelo devem auxiliar no cálculo das produtividades realizadas in loco.

6.2 Materiais e Métodos

A área de estudo abrange as lavouras de cana-de-açúcar localizadas na região nordeste do Estado de São Paulo e é delimitada pelas coordenadas 20°46' a 21°50' de latitude sul e 47°16' a 48°14' de longitude oeste. A região possui clima tipicamente tropical, onde os meses de janeiro a março são chuvosos (precipitação média de 30 anos (1971 -2000): 607 mm), sendo os meses de janeiro e fevereiro os mais quentes (temperatura média de 30 anos (1971 -2000): 24,3°C); os meses de julho a setembro são mais secos (precipitação média: 118,2 mm) sendo o mês de junho o mais frio (temperatura média de 30 anos (1971 -2000): 18,6°C) (UNESP, 2011). A altitude do local varia de 500 a 800 metros, a declividade varia de 0 a 8% (plano a suavemente ondulado) (OLIVEIRA et al., 1999). Os latossolos são os solos predominantes na área (MARTORANO et al., 1999). A área de estudo abrange as lavouras de

cana-de-açúcar localizadas na região nordeste do Estado de São Paulo e é delimitada pelas coordenadas 20°46' e 21°50' de latitude sul e 47°16' e 48°14' de longitude oeste. A região possui clima tipicamente tropical, onde os meses de janeiro a março são chuvosos (precipitação média no período de 1971-2000: 607 mm), sendo os meses de janeiro e fevereiro os mais quentes (temperatura média no período de 1971-2000: 24,3 °C); os meses de julho a setembro são mais secos (precipitação média: 118,2 mm) sendo o mês de junho o mais frio (temperatura média no período de 1971 -2000: 18,6 °C) (UNESP, 2011). De acordo com os dados obtidos pelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e interpolados para grade de 30 metros por VALERIANO & ROSSETTI (2012), a altitude do local varia de 500 a 800 metros e o relevo varia de plano a suavemente ondulado.

Variedades de cana-de-açúcar

Nessa área de estudo, predominam três variedades de cana: uma precoce (RB85-5156), cuja colheita ocorre no início da safra (abril a maio); uma média (RB92-5345), colhida na metade da safra (maio a julho); e uma tardia (RB86-7515), colhida no final da safra (julho a setembro). A variedade RB85-5156 possui elevado touceiramento, principalmente na soca, colmos eretos, mas decumbentes na fase adulta, diâmetro fino a médio, cor verde-clara e presença de rachaduras e muita palha. Ela apresenta ainda ótima capacidade de brotação de soqueiras e alta precocidade (Tabela 6.1).

A variedade RB92-5345 caracteriza-se pelo desenvolvimento rápido, hábito de crescimento ereto, difícil despalha, diâmetro de colmo médio, coloração roxo-amarelada quando exposta ao Sol e presença destacada de cera e gema ovalada. Possui ainda alto teor de sacarose, alta produtividade e alto teor de fibra no início de safra. A variedade RB86-7515 apresenta alta velocidade de crescimento, porte alto, hábito de crescimento ereto, alta densidade de colmo, cor verde arroxeadado que se acentua quando exposta ao Sol e fácil despalha. Ela é tolerante à seca, possui boa brotação de soqueira, mesmo colhida crua, alto teor de sacarose, crescimento rápido e alta produtividade (HOFFMANN et al., 2008).

Tabela 6.1. Características agronômicas das variedades de cana-de-açúcar RB85-5156, RB86-7515 e RB92-5345 consideradas nesse estudo.

Característica	Variedade		
	RB85-5156	RB92-5345	RB86-7515
Produção	média	alta	alta
Brotação Soca	ótima	boa	boa
Perfilhamento soca	médio	médio	médio
Velocidade de crescimento	regular	rápida	rápida
Maturação	precoce	média	tardia
Exigência em ambientes	baixa/média	média/alta	baixa
Fechamento entre linhas	bom	bom	bom
Tombamento	eventual	frequente	eventual
Densidade de colmo	fino/médio	médio	alto
Colheita	abril-maio	maio-jul	jul-set

Fonte: HOFFMANN et al. (2008).

Dados de radar

As imagens do sensor PALSAR utilizadas nesse estudo foram obtidas nas seguintes datas: 19 de fevereiro de 2007, 22 de fevereiro de 2008 e 24 de fevereiro de 2009, no modo FBS (Fine Beam Single mode), polarização HH e resolução espacial de 6,25 metros, com órbita ascendente, ângulo de inclinação de 38° e resolução radiométrica de 16 bits. As imagens foram pré-processadas para corrigir os efeitos radiométricos e geométricos. A correção radiométrica envolveu a conversão dos níveis digitais da imagem amplitude para σ° (unidade em decibel - dB) (SHIMADA et al., 2009) (Eq. 6.1). De acordo com ROSENQVIST et al. (2007), essa conversão otimiza a análise multitemporal de imagens de radar de um determinado lugar.

$$\sigma^\circ = 10 * \log (DN2) + CF \quad (6.1)$$

Onde DN corresponde ao valor digital da imagem amplitude; e CF corresponde ao fator de correção cujos valores são encontrados em AUIG (2009).

A correção geométrica das imagens PALSAR foi feita com base na imagem ortorretificada (geocover) do Landsat ETM+ de 23 de março de 2001, disponível no endereço eletrônico da Universidade de Maryland, Estados Unidos (<http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>), utilizando pontos de controle e projetadas para o sistema de projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator), datum WGS84 e fuso 23S.

Os valores de retroespalhamento referentes à cana-de-açúcar foram analisados calculando-se a média do talhão, de acordo com a variedade.

A princípio, o número de talhões para os modelos eram: modelo safra 2007/08: 47 talhões: 10 da variedade RB81-5156, 17 da variedade RB92-5345 e 20 da variedade RB86-7515; modelo safra 2008/09: 47 talhões (idem safra 2007/08), modelo 2009/10: 26 talhões: 10 da variedade RB81-5156, 16 da variedade RB92-5345 e o modelo considerando as três safras juntas do total de 120 talhões: 30 eram da variedade RB81-5156, 50 da variedade RB92-5345 e 40 da variedade RB86-7515. A área dos talhões variou de 4 a 39 hectares.

Dados agronômicos

O modelo de estimativa de produtividade de cana-de-açúcar foi obtido pela análise das seguintes variáveis agronômicas: ambiente de produção, estágio de corte, variedade de cana-de-açúcar, data de corte e produtividade da safra anterior.

O ambiente de produção é definido em função das condições físicas, hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas dos solos, do tipo de manejo da camada arável do solo em termos de preparo, calagem, adubação, da quantidade adicionada de vinhaça, torta de filtro e palha, no caso de plantio direto, do controle de ervas daninhas e pragas, das propriedades da subsuperfície dos solos e, principalmente, do clima regional (precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar e evapotranspiração). Portanto, ambiente de produção é a soma das interações dos atributos de superfície, subsuperfície e condições climáticas (PRADO, 2005). Os ambientes são classificados de A a E, do melhor ao pior ambiente, respectivamente.

O estágio de corte indica quantas vezes aquela planta já foi colhida. A cada corte, a produtividade é reduzida gradativamente, ou seja, a produtividade da cana-de-açúcar que foi cortada pela primeira vez (cana planta) e da que foi cortada pela segunda vez são bem maiores que as plantas que estão entre o quinto e sexto corte (CTC, 2004). O grau de diminuição da

produtividade ao longo dos cortes é uma característica do potencial genético da variedade, dado que uma grande energia é gasta para a rebrota a cada ano, além das condições de fertilidade do solo e de outros fatores de produção que devem ser mantidos (ROSSETO et al., 2010). Os talhões estudados estavam entre o segundo e quinto corte.

A data de corte foi inserida no modelo para averiguar a hipótese de que os talhões de cana-de-açúcar colhidos no final da safra tendem a produzir mais devido ao período de precipitação que ocorre de setembro a dezembro, fazendo com que esses talhões não sejam penalizados pelo período de seca que ocorre na metade da safra (maio a agosto).

A produtividade da safra anterior traz muita informação sobre a produtividade da safra atual, pois conforme mencionado anteriormente, a cana-de-açúcar tende a ter uma queda na sua produtividade conforme seu estágio de corte aumenta. Portanto esse dado é um indicativo de sua produtividade atual. Todos os dados agrônômicos foram adquiridos junto à usina proprietária da área de estudo.

Variáveis do modelo

Foram gerados quatro modelos de regressão linear múltipla, um para cada safra (2007/08, 2008/09 e 2009/10) e o quarto para as três safras juntas, para estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar por talhão. Inicialmente, o modelo de estimativa de produtividade agrícola de cana-de-açúcar foi composto pelas variáveis: retroespalhamento referente à imagem PALSAR do mês de fevereiro (daquela safra), variedade da cana-de-açúcar, ambiente de produção, estágio de corte, data de colheita e a produtividade do talhão na safra anterior.

A variável variedade da cana-de-açúcar é composta por três classes: RB85-5156, RB92-5345 e RB86-7515; a variável ambiente de produção cinco classes, variando do ambiente B (senão havia ambiente A nos talhões estudados) ao ambiente E (pior ambiente); a variável estágio de corte, composta por quatro classes: 2º, 3º, 4º e 5º corte. Essas variáveis qualitativas foram transformadas em variáveis dummy e então foi aplicada a técnica de Best Subsets (NETER et al., 1996), que identifica o melhor subconjunto de preditores dentro do conjunto inicialmente especificado para estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar por talhão. Dessa forma, foi possível determinar modelos de estimativa com boa qualidade de

ajuste e com o menor número possível de preditores, tudo isso baseado nos valores do coeficiente de determinação.

A análise dos resíduos foi realizada para verificar a homocedasticidade, a normalidade e a independência dos resíduos. Foi verificado também se havia presença de multicolinearidade, ou seja, se os preditores eram dependentes linearmente. A presença de outliers foi avaliada pelo gráfico dos resíduos.

Após as análises já citadas, foi realizado o cálculo da produtividade agrícola em escala de lavoura (talhão). Os modelos foram avaliados pelos valores de σ^2 e pela análise de aproximadamente 20% do total de talhões, selecionados aleatoriamente, que não foram incluídos na criação dos modelos de estimativa da produtividade agrícola. Para isto, os modelos de estimativa da produtividade foram calculados para esses talhões selecionados. Posteriormente foram realizadas as análises de regressão linear simples entre as produtividades estimadas pelo modelo e as produtividades reais. O modelo também foi avaliado pelo índice d modificado de Willmott que verifica a concordância entre os dados observados e os estimados (WILLMOTT et al., 1985). Além do índice d, também foram fornecidos os valores de erro aleatório (EA) e erro padrão (EP) (ALLEN, 1986). O coeficiente de determinação (R²) indicou a precisão do modelo, ou seja, o quanto a oscilação da variável dependente é explicada pelas variáveis independentes e o p-valor indicou se o modelo foi significativo ao nível de 5% de significância. As produtividades médias estimadas (PME) foram calculadas após os modelos terem sido testados em 20% do total de talhões, ou seja, após a estimativa ser calculada para cada um dos talhões fez-se a média aritmética da produtividade dos mesmos. A produtividade média real (PMR) também foi calculada para os mesmos dados utilizando as informações de campo da produção total colhida e o tamanho dos talhões, ambos fornecidos pela usina.

Por fim, o teste t foi calculado para comparar a produtividade estimada pelo modelo, nos dados selecionados, com a produtividade real. Esta avaliação permitiu analisar as diferenças entre os valores médios de produtividade estimada pelos modelos em relação aos valores médios das produtividades reais.

6.3 Resultados e Discussão

A técnica de *Best Subset* apontou que o melhor subconjunto de preditores, dentro do conjunto inicialmente especificado, seria obtido com o uso de seis variáveis. Os valores do coeficiente de determinação (R^2) tendem a se estabilizar e, portanto, a produtividade real não seria estimada com mais precisão com o uso de todas as variáveis disponíveis no modelo de regressão.

O modelo sugerido pela técnica de *Best Subset* indicou as seguintes variáveis qualitativas (*dummy*): a variedade da cana-de-açúcar RB92-5345, que dentre as três variedades foi a que mais produziu: na safra 2007/08, entre 6 e 20 t ha⁻¹; na safra 2008/09, entre 13 e 15 t ha⁻¹; e na safra 2008/09, aproximadamente 14 t ha⁻¹ a mais que as outras variedades, por talhão; a variável ambiente de produção somente a classe B entrou no modelo, por se tratar do melhor ambiente dentre os talhões estudados; a variável estágio de corte contribuiu com o menor corte; e as variáveis quantitativas: os valores de σ° da imagem PALSAR de fevereiro (de cada safra), pois é quando a cana-de-açúcar encontra-se em seu período de desenvolvimento máximo (novembro a abril) (CASTRO, 1999); a data de corte, pelo fato de que a cana-de-açúcar colhida no final da safra tende a ser menos penalizada pelo período de seca que ocorre no meio da safra; e produtividade da safra anterior, que ajuda a explicar a variação da produtividade da safra atual.

É possível observar na Tabela 6.2, que todas as variáveis selecionadas no modelo têm importância significativa ao nível de 10%, porém, nem sempre acontece num mesmo modelo. Por exemplo, a variável RB92-5345 só não foi significativa no modelo de estimativa de produtividade na safra 2009/10. Com a análise dos valores dos coeficientes (β), foi verificado que a variável retroespalhamento da imagem PALSAR da data de fevereiro teve sempre uma contribuição positiva na estimativa de produtividade, pois os valores de σ° variavam entre -8 e -13,6 dB e os valores de β foram sempre negativos. A variável que menos contribuiu foi a produtividade da safra anterior, mas que foi considerada como importante, pois é um indicativo da produtividade da safra atual.

Tabela 6.2. Coeficientes estimados pela análise de regressão (coef), teste t (t) e p-valores (p).

Características	2007/08		2008/09		2009/10		Todas as Safras	
	p	t Coef	p	t coef	p	t coef	p	t coef
Constante	0,2*	1,4 28	0	2,3 64	0	-3 -197	0	3,7 53,5
RB92-5345	0	4,5 27,2	0,1	1,9 12	0,9*	-0 -7,6	0	6 17,9
Ambiente B	0	3,8 25,1	0,9*	0,2 2,6	0,7*	0,4 3,4	0	3,4 19,3
Corte (mais baixo)	0	2,8 15,7	0,8*	0,2 1,7	0	2,9 18,6		
PALSAR - Fev.	0,6*	-1 -0,7	0,9*	-0 -0,7	0	-5 -19	0,5*	-1 -0,6
Data de corte	0	6,2 0,2	0,9*	-0 0	0,3*	1 0,6	0	5,3 0,1
Produtividade (safra anterior)	0,4*	0,8 0,1	0,6*	0,6 0,1	0	-2 -0,6	0,2*	1,4 0,1
3° corte							0,1	-2 -7,9
4° corte							0,1	-2 -19
5° corte							0	-2 -27
safra 2008/09							0,3*	-1 -5,7
safra 2009/10							0,5*	-1 -6

* Não significativo a 5% de probabilidade.

Verificou-se pela Tabela 6.3 que o modelo de estimativa de produtividade agrícola mais preciso foi o da safra de 2007/08, que explicou 79,5% da variação da produtividade. O teste t também mostrou que a relação entre a variável dependente e as variáveis independentes é significativa, além disso, foi o modelo que apresentou a menor variabilidade média sobre a reta de regressão (Figura 6.1a). O modelo de estimativa de produtividade foi aplicado a um novo conjunto de dados (20% do total de talhões) para avaliá-lo e o resultado foi próximo ao obtido anteriormente com um coeficiente de determinação ajustado de 71% e um p-valor aproximadamente igual a zero, para essa safra.

Tabela 6.3. Produtividade média real (PMR) e o desvio padrão (s), produtividade média estimada pelo modelo de estimava (PME) e o desvio padrão (s), coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado), variabilidade sobre a reta de regressão (S), índice de concordância (d) de Willmott, erro aleatório (EA), erro padrão (EP) e o teste t do modelo agrônômico para as safras 2007/08, 2008/09, 2009/10 e para todas as safras.

Parâmetro	Safra			
	2007/08	2008/09	2009/10	Todas as Safras
PMR	98,0 t ha ⁻¹ (s = 14,6 t ha ⁻¹)	84,8 t ha ⁻¹ (s = 13,8 t ha ⁻¹)	82,5 t ha ⁻¹ (s = 21,6 t ha ⁻¹)	90,4 t ha ⁻¹ (s = 14,6 t ha ⁻¹)
PME	98,02 t ha ⁻¹ (s = 13,4 t ha ⁻¹)	84,8 t ha ⁻¹ (s = 7,2 t ha ⁻¹)	81,9 t ha ⁻¹ (s = 19,3 t ha ⁻¹)	90,5 t ha ⁻¹ (s = 12 t ha ⁻¹)
R^2 ajustado	0,79	0,12	0,74	0,66
Índice d modificado	0,96	0,65	0,94	0,91
EA	4,6 t ha ⁻¹	9,6 t ha ⁻¹	8,4 t ha ⁻¹	6,3 t ha ⁻¹
EP	4,12 t ha ⁻¹	10,1 t ha ⁻¹	9,8 t ha ⁻¹	7,8 t ha ⁻¹
Teste t	0,99	0,98	0,92	0,96

O modelo da safra de 2008/09 não conseguiu estimar com boa precisão a produtividade agrícola da cana-de-açúcar para esta safra. Isso pode ter ocorrido devido a um longo período de estiagem que ocorreu nessa safra. É possível verificar na Figura 2 que houve deficiência hídrica desde o mês de fevereiro até dezembro de 2008, o que prejudicou o desenvolvimento da cana-de-açúcar. O modelo não apresentou bons valores de estimativa de produtividade (R^2 ajustado = 0,12) por não possuir nenhuma variável agrometeorológica, que pudesse indicar problemas no desenvolvimento da cultura. Dessa forma, o modelo não conseguiu estimar com exatidão a produtividade dessa safra, que por sua vez foi menos produtiva, ocasionado pelo extenso período de seca. Porém, quando foi calculada a produtividade média estimada, de todos os talhões da safra 2008/09, o modelo conseguiu aferir corretamente.

Tanto a produtividade média real quanto a produtividade média do modelo dos talhões foi de 84,8 t há⁻¹, com desvio padrão igual a 14,6 t ha⁻¹ para os dados reais e 13,4 t ha⁻¹ para os dados estimados, mostrando que, na média, o modelo conseguiu estimar com boa

precisão a produtividade agrícola da cana-de-açúcar. O acréscimo de uma variável agrometeorológica é de grande importância para o modelo de estimativa, como por exemplo, o uso de dados do modelo ECMWF que FERNANDES et al. (2011) utilizaram para o cálculo da produtividade da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Porém, os dados do modelo ECMWF possuem uma resolução espacial maior (25 km) do que a utilizada neste estudo (12,5 metros), mas ainda assim foram feitos testes com os dados do modelo ECMWF interpolados e inseridos nos modelos e os resultados não foram satisfatórios. Outros modelos também utilizaram dados meteorológicos, como o do modelo ETA, desenvolvido, por exemplo, por RIZZI et al. (2007) e PICOLI et al. (2009), porém, o modelo ETA possui resolução incompatível (15 km) a do modelo de estimativa gerado neste trabalho.

Considerando os modelos de estimativa de produtividade para a safra 2009/10 e das três safras juntas estes explicaram 74% e 66% da variabilidade da produtividade real (Figuras 6.1c e 6.1d) com um erro padrão de 8,4 e 6,3 t ha⁻¹, respectivamente.

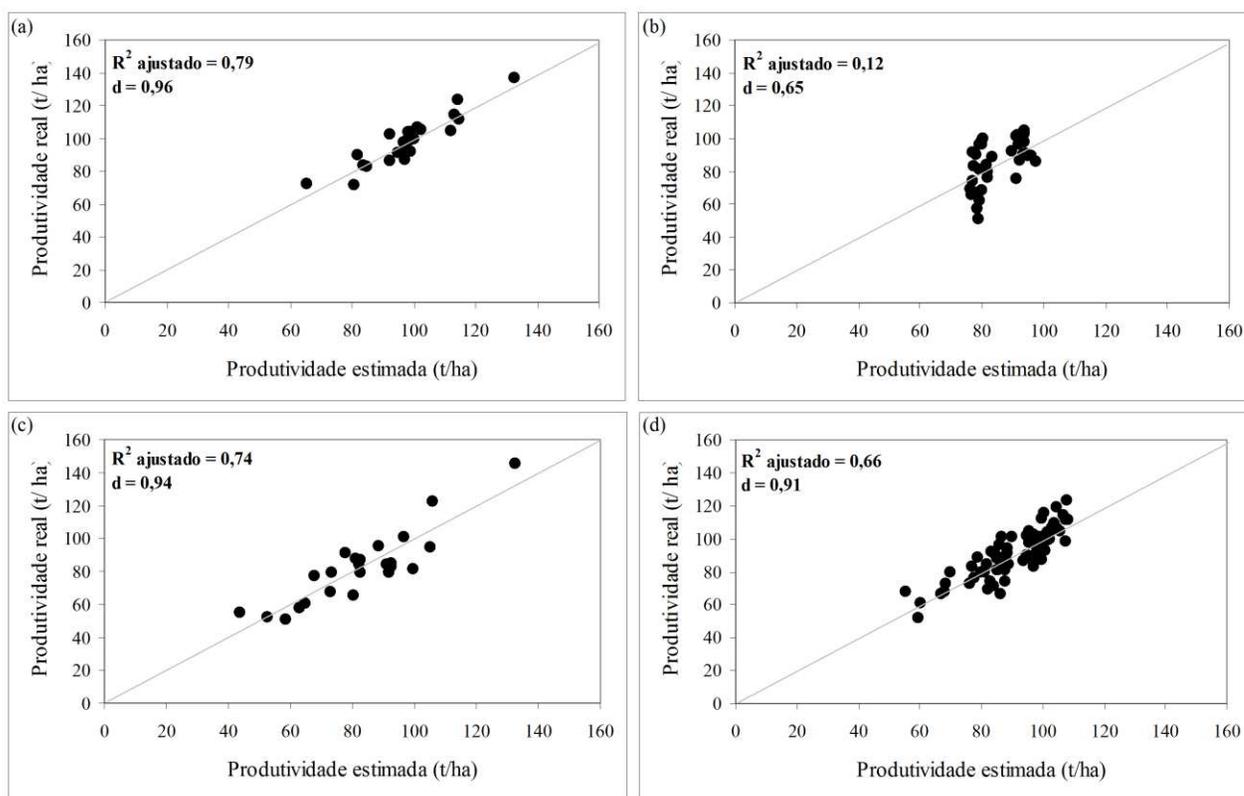


Figura 6.1. Relação entre a produtividade real e a produtividade estimada pelo modelo agrônomo nas safras 2007/08 (a), 2008/09 (b), 2009/10 (c) e todas as safras (d).

O modelo de estimativa de produtividade das três safras juntas foi testado em um novo conjunto de dados (talhões). O resultado foi um coeficiente de determinação igual a 66%. Acredita-se que esse modelo de estimativa não obteve resultados mais significativos devido à inclusão dos dados da safra 2008/09, que foi, conforme mencionado anteriormente, uma safra atípica.

Para a safra 2009/10, não houve dados suficientes para separar um conjunto de dados (talhões) para avaliar o modelo de estimativa, pois os talhões da variedade RB86-7515 não foram colhidos nessa safra.

O índice de concordância d modificado, próximo de um, caracteriza concordância quase perfeita entre o dado estimado e o dado real, portanto para as safras 2007/08, 2009/10 e para as três safras juntas ($d > 0,9$) o modelo conseguiu estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar com mais exatidão do que para a safra 2008/09 ($d = 0,65$). Isto pode ter acontecido devido ao fato da cana-de-açúcar, na safra 2007/08, ter sofrido com a estiagem e isso influenciou negativamente seu desempenho na safra 2008/09.

O teste t para comparação de médias entre os valores de produtividade estimados pelos modelos e pelas produtividades médias reais revelou que não existe diferença significativa em todas as safras com um nível de 5% de significância. Esse fato também pode ser observado comparando os valores da produtividade média estimada pelos modelos com os das produtividades médias reais (Tabela 3) que foram semelhantes.

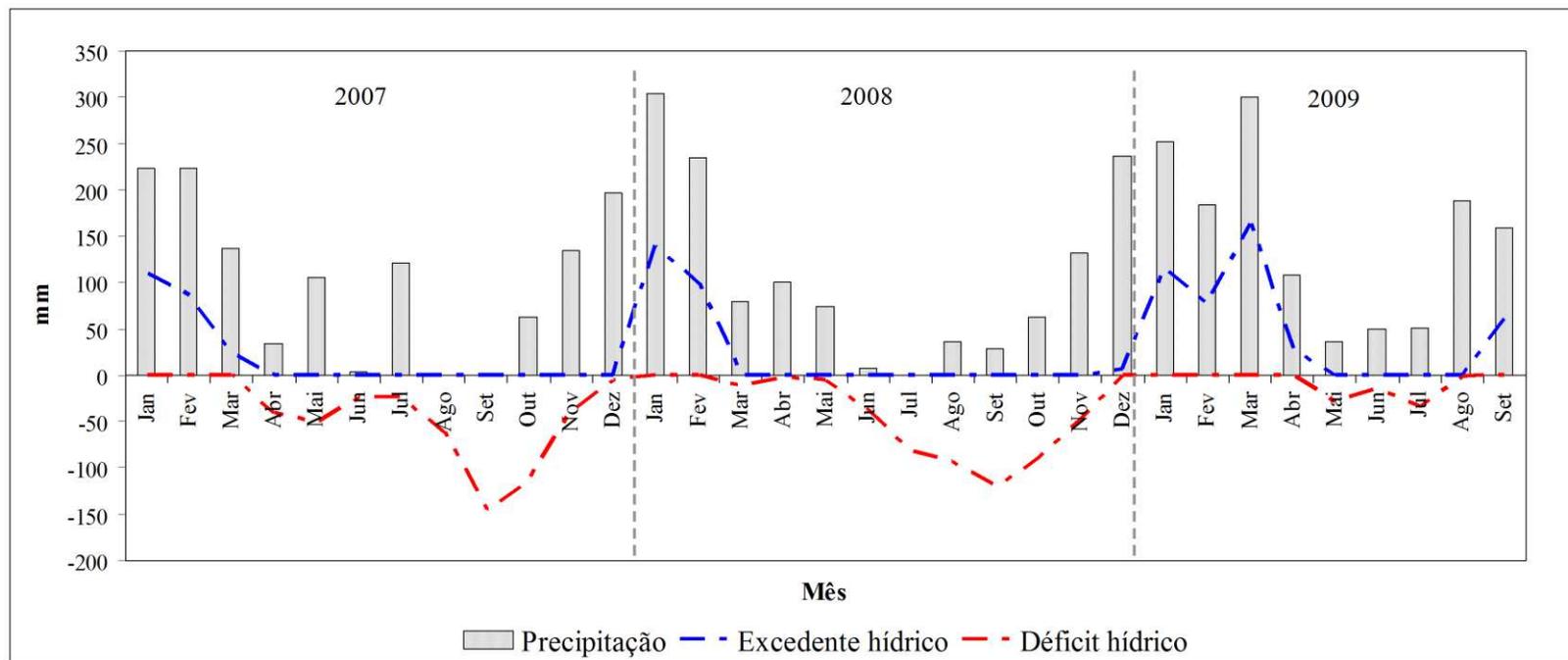


Figura 6.2: Variação temporal do balanço hídrico e da precipitação ao longo das três safras (2007/08, 2008/09 e 2009/10).

À luz dos resultados se levanta a hipótese de que outros fatores (por exemplo: variáveis meteorológicas e variáveis de campo, como adubação) não considerados neste estudo exerceram influência na formação da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. Outra hipótese é a de que a resolução temporal das variáveis consideradas não seja adequada para representar seus efeitos sobre a produtividade agrícola da planta, devendo o modelo ser calculado quinzenalmente ou até mensalmente. E, principalmente, a falta de um índice que proporcione a penalização da produtividade em função da ocorrência de períodos de seca em épocas importantes para o desenvolvimento da planta.

6.4 Conclusão

Foi possível estimar a produtividade agrícola dos talhões de cana-de-açúcar através dos modelos desenvolvidos, cujas variáveis utilizadas foram: retroespalhamento (PALSAR - HH), variedade da cana-de-açúcar (RB92-5345), ambiente de produção, data do corte, estágio de corte e a produtividade da safra anterior. Os modelos se mostraram eficientes, principalmente, na estimativa do cálculo da produtividade média dos talhões de cana-de-açúcar, onde as estimativas foram bem próximas aos valores reais. Observou-se a necessidade da inclusão de variáveis agrometeorológicas para explicar variações na produtividade da cana-de-açúcar relacionadas a eventos climáticos, como a estiagem.

Agradecimentos

À FAPESP (Projeto 2008/06043-5) e ao CNPq pelo apoio financeiro. À Dra. Laura Hess (Universidade da Califórnia), pelo fornecimento das imagens PALSAR/ALOS. E ao grupo Raízen, pelas sugestões e apoio de campo.

Referências

- AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y. E. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 3, p. 440-451, 2009.
- ALLEN, R. G. A. Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 112, p. 348-386, 1986.

- AUIG - ALOS User Interface Gateway. **PALSAR: Calibration factor updated**. Disponível em: <https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/en/doc/an/20090109en_3.html>. Acesso em: 8 jun. 2009.
- BAGHDADI, N.; BOYER, N.; TODOROFF, P.; EL HAJJ, M.; BÉGUÉ, A. Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 1724-1738, 2009.
- CASTRO, P. R. C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In: SEMANA DA CANA-DE-AÇÚCAR DE PIRACICABA, 4. Piracicaba, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, p. 12-16. 1999.
- CTC. Centro de Tecnologia Canavieira. **Censo Varietal Copersucar 2003**. Piracicaba: CTC, 16 p., 2004.
- FERNANDES, J. L.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Sugarcane yield estimates using time series analysis of SPOT vegetation images. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 139-146, 2011.
- GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, p. 808-810, 2007.
- HOFFMANN, H. P.; SANTOS, E. G. D.; BASSINELLO, A. I.; VIEIRA, M. A. S. **Varietades RB de cana-de-açúcar**. Araras: UFSCar, 30 p., 2008.
- IAC. Instituto Agronômico de Campinas. **Centro integrado de informações agrometeorológicas**. Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br/>. Acesso em: 24 jan. 2010.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/>>. Acesso em: 15 jul. 2010.
- JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T. T. (ed.), **Water Deficits and Plants Growth**. Nova Iorque: Academic Press, v. 2, p. 1-22, 1968.
- LIN, H.; CHEN, J.; PEI, Z.; ZHANG, S.; HU, X. Monitoring sugarcane growth using ENVISAT ASAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, p. 2572-2580, 2009.
- MENDONÇA, J. C.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SOUSA, E. F.; MUNIZ, R. A.; ESTEVES, B. S. Mapeamento das áreas de cana-de-açúcar na região norte fluminense – RJ

por uso de técnicas de sensoriamento remoto. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 561-571, 2011.

MORAES, M. Perspective: Lessons from Brazil. **Nature**, v. 474, 2011.

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied Linear Statistical Model**. New York: McGraw-Hill, 1408 p., 1996.

PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, p. 789-795, 2009.

PRADO, H. **Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil**. Encarte Técnico. Informações Agronômicas, n. 110, 2005. Disponível em: [http://www.ipni.net/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/7759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/\\$FILE/Encarte110.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/7759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/$FILE/Encarte110.pdf). Acesso em: 15 jan. 2010.

ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M.; ITO, N.; WATANABE, M. ALOS PALSAR: a pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 11, p. 3307-3316, 2007.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A.; CANTARELLA, H. Manutenção da fertilidade dos solos na cultura da cana-de-açúcar. In: CORTEZ, L. A. B. (eds.), **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: Pesquisa e Desenvolvimento para Produtividade e Sustentabilidade**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, v. 1, p. 381-403, 2010.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; BATISTA, G. T.; LEE, D. The contribution of qualitative variables to a sugarcane yield model based on spectral vegetation index. In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 7. Puerto Vallarta, México. **Anais...** Puerto Vallarta: SELPER, p.705-708, 1995.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR radiometric and geometric calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, p. 3915-3932, 2009.

SIMÕES, M. S.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Orbital spectral variables, growth analysis and sugarcane yield. **Scientia Agrícola**, v. 66, p. 451-461, 2009.

SUGAWARA, L. M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, C. C.; PICOLI, M. C. A.; ADAMI, M. Estimativa de produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) por meio de técnica de análise de regressão linear múltipla. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, SC. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.435-442, 2007.

UNESP. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. **Resenha meteorológica do período 1971 – 2000.** Jaboticabal. Disponível em: http://jaguar.fcav.unesp.br/portal_agromet/int_conteudo_sem_img.php?conteudo=180. Acesso em: 20 jan. 2011.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012.

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.

7. CONCLUSÕES GERAIS

O sensor PALSAR/ALOS se mostrou eficaz no monitoramento da cana-de-açúcar e complementar aos dados ópticos. Pois apresentou variações, nos valores de σ^0 , significativas entre as diferentes fases fenológicas da cultura.

Os resultados mostraram que, o sentido das linhas de plantio (paralelas e perpendiculares à direção da linha de viasada de sensor), apresentam diferenças estatísticas nos valores de σ^0 , e essas diferenças precisam ser levadas em conta quando se utiliza dados SAR da banda L. A fim de obter mapas mais precisos dos canaviais ou para monitorar a cultura da cana-de-açúcar, é recomendado dar preferência para imagens com polarização HV. Também é sugerido construir e validar algumas técnicas de processamento de imagem que têm potencial para o desenvolvimento de uma técnica de processamento de imagem efetiva para corrigir os efeitos das linhas de plantio nas imagens ALOS/PALSAR com polarização HH.

O uso do modelo de estimativa da produtividade agrícola em talhões de cana-de-açúcar se mostrou eficiente para auxiliar no cálculo da produtividade. Os modelos se mostraram capazes, principalmente, na estimativa do cálculo da produtividade média da cana-de-açúcar, chegando a estimar o valor idêntico ao real em algumas safras. Porém, ainda há a necessidade da inclusão de variáveis agrometeorológicas para aprimorar tais modelos.

Como trabalho futuro é sugerido o desenvolvimento de técnicas para retirar o efeito do sentido das linhas de plantio nas imagens PALSAR, e a incorporação de variáveis agrometeorológicas no modelo de estimativa da produtividade agrícola em talhões de cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFONSI, R. R.; PEDRO, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. São Paulo: Fundação CARGILL, 1987. Capítulo 1, p. 42-87. 1987.

ALMEIDA, T. S.; FONTANA, D. C.; MARTORANO, L.G.; BERGAMASCH, H. Índices de vegetação para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais... XII-SBSR**. São José dos Campos: INPE. p.17-24. 2005.

AMARAL, S.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento Remoto por Radar (SAR): pré-processamento de imagens RADARSAT ("Fine Mode") na região da Floresta Nacional do Tapajós. In: Latino-American Seminar On Radar Remote Sensing: Image Processing Techniques, 1., 1996. Buenos Aires, Argentina. **Proceedings...** Buenos Aires: ESA Publications Divisions. p. 37- 42. 1996.

AUIG - ALOS User Interface Gateway. PALSAR: **Calibration factor updated**. Disponível em: https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/en/doc/an/20090109en_3.html (acessado em: 8 jun. 2009).

BAGHDADI, N.; BOYER, N.; TODOROFF, P.; HAJJ, M.; BÉGUÉ, A. Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. **Remote Sensing of Environment**. v. 113, p. 1724-1738. 2009.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: Planalsucar – Coordenadoria Regional Sul – COSUL. Climatologia. p. 1-22. 1977.

BECKER-RESHEF, I.; VERMOTE, E.; LINDEMAN, M.; JUSTICE, C. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 1312-1323, 2010.

BERKA, L. M. S.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 3, p. 433-440. 2003.

BRAKKE, T. W.; KANEMASU, E. T.; STEINER, J. L.; ULABY, F. T.; WILSON, E. Microwave radar response to canopy moisture, leaf-area index, and dry weight of wheat, corn, and sorghum. **Remote Sensing of Environment**, v. 11, p. 207-220, 1981.

BRISCO, B.; BROWN, R. J.; MANORE, M. J. Early season crop discrimination with combined SAR/TM data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.15, n. 11, p. 44-56, 1989.

BRISCO, B.; BROWN, R. J.; GAIRNS, J. G.; SNIDER, B. Temporal ground-based scatterometer observations of crops in Western Canada. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 1, p. 14-22. 1992.

BRISCO, B.; BROWN, R. J. Agricultural applications with Radar. In: **Principles and applications of imaging radar: manual of remote sensing**. New York: Floyd M. Henderson e Anthony J. Lewis. 866 p. 1997.

CASTRO, P. R.C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In: IV Semana da cana-de-açúcar de Piracicaba. Piracicaba, 1999. **Anais... IV SECAP**. Piracicaba. p. 12-16. 1999.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA – CTC. **Censo Varietal Copersucar 2003**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira. 16 p. 2004.

CLEVERS, J. G. P. W.; LEEUWEN, H. J. C. Combined use of optical and microwave remote sensing data for crop growth monitoring. **Remote Sensing of Environment**, v. 56, p. 42-51. 1996.

COOPERATIVA DOS PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (COPERSUCAR). **Recomendação de adubação para a cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba – SP: Copersucar, 1988. 7 p.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T.; PIERCE, L. E. Land cover classification and estimation of terrain attributes using Synthetic Aperture Radar. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p.199-214, 1995.

FERNANDES, J.L.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Sugarcane yield estimates using time series analysis of SPOT vegetation images. **Scientia Agricola**, v.68, p.139-146, 2011.

FERRAZZOLI, P.; PALOSCIA, S.; PAMPALONI, P.; SCHIAVON, G.; SIGISMONDI, S.; SOLIMINI, D. The potential of multifrequency polarimetric SAR in assessing agricultural and arboreous biomass. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 35, p. 5-17. 1997.

FORTES, C. Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/LANDSAT 7. 2003. 131 p. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2003.

FREITAS, C. C.; SANT'ANNA, S. J. S.; RENNÓ, C. D.; CORREA, A. H. **Utilização de imagens de radar de abertura sintética na classificação de uso e ocupação do solo**. São José dos Campos: INPE, 2007-08-11. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/08.10.18.20>. Acesso em: 15 junho de 2008.

GALVÃO, Lênio Soares ; FORMAGGIO, A. R. ; TISOT, D. A. . Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 523-534, 2005.

GUTMAN, G.; TARPLEY, D.; IGNATOV, A. The enhanced NOAA global land dataset from the Advanced Very High Resolution Radiometer. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 76, n. 7, p. 1141-1156. 1995.

GUTTMAN, G.B. Comparing the Palmer Drought Index and the “Standardized Precipitation Index”. **Journal of the American Water Resources**, v.16, n. 2, p. 113-121, 1998.

GUTTMAN, G.B. Accepting the “Standardized Precipitation Index”: A calculation algorithm. **Journal of the American Water Resources**, v. 35, n. 2, p. 311- 322, 1999.

HUMBERT, R. P. **El cultivo de la caña de azucar**. México, Companhia Editorial Continental. 719p. 1974.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/> (acessado em: 15 jul. 2010).

LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V. ; MACHADO, H. M. Using NDVI as a support to sugar cane yield estimate. In: European Conference on precision agriculture, 2003, Berlim. 4 th European Conference on Precision Agriculture, 2003. **Anais...** v. 1. p. 1-3. 2003.

LUCCHESI, A. A. **Processos fisiológicos da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. Boletim Técnico ESALQ/CENA, n.7, p.1-50, 1995.

- MAGALHÃES, A. C. N. **Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono da planta**. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Yamada, T. (Coord.) Ecofisiologia da Produção. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa do Potássio e do Fósforo. p. 113-118. 1987.
- MANGELSDORF, A. J. **Um programa de melhoramento da cana-de-açúcar para a agroindústria canavieira do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto do Açúcar e do álcool. 63 p. 1966.
- MANN, H.B.; WHITNEY, D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, n. 1, p. 50-60, 1947.
- MARCHIORI, L. F. S. Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar. 2004. 275 p. **Tese** (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.
- MAXIMILIANO, S. S. Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos. 2002. 79 p. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2002.
- MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: Conference on Applied Climatology, 1993, Anaheim. **Anais**. Boston: American Meteorological Society, 1993. p.179-184.
- MCNAIRN, H.; HOCHHEIM, K.; RABE, N. Applying polarimetric radar imagery for mapping the productivity of wheat crops. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 517-524, 2004.
- MCNAIRN, H.; BRISCO, B. The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: a review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 525-542, 2004.
- MORAES, M. Perspective: Lessons from Brazil. **Nature**, 2011, 474, 25. Disponível em: http://www.nature.com/nature/journal/v474/n7352_supp/full/474S025a.html (acessado em: 13 ago. 2010).

- NUNES JUNIOR, D. M. S. **Variedades de cana-de-açúcar**. In: Paranhos, S. B. Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. São Paulo: Fundação Cargill. 856p. cap.2 v.1, p.187-259. 1987.
- PAMPALONI, P.; MACELLONI, G.; PALOSCIA, S.; SIGISMONDI, S. The potential of C and L- band SAR in assessing vegetation biomass: the ERS-1 and JERS-1 experiments. In: 3rd ERS Symposium on Space at the service of our Environment, 1997, Florence, Italy. **Proceeding**, v. 3, p. 1729-1734. 1997.
- PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, n. 3, p. 789-795, 2009.
- PRADO H.; LANDELL, M.G.A.; ROSSETTO, R.; CAMPANA, M.P.; ZIMBACK, L.; SILVA, M.A. Relation between chemical sub surface conditions of subsoils and sugarcane yield. In: World Soil Science Congress, 16, 1998, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: ISSS, 1998, v. 1, p. 232. Available in: <http://www.iuss.org/images/stories/19th%20WCSS/1998%20-20France/RESUMES%20SUMMARIES%20VOL%20I%20AOUT%201998.pdf> [Accessed Jul. 05, 2010].
- RICAUD, R. B.; COCHRAN, M. Methods of planting sugarcane for sugar and biomass production in Louisiana. In: Congresso of International Society of sugar cane technologists, Louisiana, 1980. **Proceedings**. Louisiana: ISSCT, 1980. p. 118-120. 1980.
- RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 73-80, 2007.
- RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Resposta Espectral da Cana-de-açúcar Através de Dados Multiespectrais do MSS do Landsat-4. In: IV Reunião da Sociedade de Especialistas Latinoamericanos em Sensoriamento Remoto – Selper, 4, 1984. Chile. **Anais...** São José dos Campos: INPE. 12p. 1985.
- RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugar-cane based on agrometeorological - Spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 3, p. 183-192, September 1990.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Wheat yield estimation at the farm level using Landsat-TM and agrometeorological data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 12, p. 2477-2484, 1991.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; BATISTA, G. T.; LEE, D. The contribution of qualitative variables to a sugarcane yield model based on spectral vegetation index. In: VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, 1995, Puerto Vallarta. Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota. SELPER e SIE. **Anais...** v.1. p.705 – 708. 1995.

RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; XAVIER, A. C.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; ROSA, V. G. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Estimativa de área plantada com cana-de-açúcar em municípios do estado de São Paulo por meio de imagens de satélites e técnicas de geoprocessamento: ano safra 2003/2004. **Relatório Técnico**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 47 p. 2004.

SANO, E. E. ; FERREIRA, L. G. ; HUETE, A. R. Synthetic Aperture Radar (L band) and Optical Vegetation Indices for Discriminating the Brazilian Savanna Physiognomies: A Comparative Analysis. **Earth Interactions Journal**. v. 9, Paper n. 15, p. 1-15, 2005.

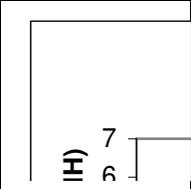
SCHOTTEN, C. G. J.; VAN ROOY, W. W. L.; JANSSEN, L. L. F. Assessment of the capabilities of multi-temporal ERS-1 SAR data to discriminate between agricultural crops. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 14, p. 2619-2637. 1995.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965.

SHIMADA, M.; ISOYUCHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 12, 2009.

SILVA, W. F.; RUDORFF, B. F. T.; FORMAGGIO, A.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. Discrimination of agricultural crops in a tropical semi-arid region of Brazil based on L-band polarimetric airborne SAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 5, p. 458-463, 2009.

- SIMÕES, M. S. ; FORMAGGIO, A. R. F. ; EPIPHANIO, J. C. N. ; FREITAS, C. C. . Evaluation of Radarsat multitemporal data for crop discrimination in highly cultivated areas. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999, Hamburgo. **Proceedings of the IGARRS'99**. p. 01-04. 1999.
- SPEARMAN, C. The proof and measurement of association between two things. **The American journal of psychology**, v. 15, p. 72-101, 1904.
- TISOT, D. A. ; FORMAGGIO, A. R. ; RENNÓ, C. D. ; GALVÃO, L. S. Eficácia de dados Hyperion/EO-1 para identificação de alvos agrícolas: comparação com dados ETM+/Landsat-7. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 511, 2007.
- THIAGO, L. R. L. S.; VIEIRA, J. M. Cana-de-açúcar: uma alternativa de alimento para a seca. EMBRAPA Gado de Corte - **Comunicado Técnico**. n. 73, 2002.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.
- ULABY, F. T.; BATLIVALA, P. P.; DOBSON, M. C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture, part I: bare soil. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 16, n. 4, p.286–295, Oct. 1978.
- ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A . K. **Microwave remote sensing: active e passive: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory**. 2 ed. v. 2. Norwood, MA: Artech House. 1064 p. 1982.
- ULABY, F. T.; ALLEN, C. T.; EGER, G.; KANEMASU, E. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index. **Remote Sensing of Enviroment**, v. 14, n. 1-3, p. 113-133. 1984.
- UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO - UNICA. **Cana-de-açúcar: produtos**. Disponível em: http://www.unica.com.br/pages/cana_produtos.asp. Acesso em novembro/2004.



UNESP. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO".
Resenha meteorológica do período 1971 – 2000. Jaboticabal. Disponível em:
http://jaguar.fcav.unesp.br/portal_agromet/int_conteudo_sem_img.php?conteudo=180. Acesso
em: 20, jan 2011.

YUN, S.; HUADONG, G.; HAO, L.; JUNFEI, L.; XINQIAO, L. Effect of Polarization and
frequency Using GlobeSAR Data Vegetation Discrimination. **Geocarto International**, v.10,
n. 3, p. 71 – 78, 1995.