

## As variações temporais do NDVI e a dinâmica do funcionamento hídrico em paisagens de tabuleiros costeiros no Norte de Espírito Santo

RAÚL SÁNCHEZ VICENS<sup>1</sup>  
FERNANDO VIEIRA AGAREZ<sup>2</sup>  
CARLA MADUREIRA CRUZ<sup>1</sup>  
CLAUDIA NOGUEIRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ  
Caixa Postal 68537 – CEP 21945-970 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil  
rcuba@igeo.ufrj.br

<sup>2</sup>Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ  
Rio de Janeiro – RJ, Brasil  
agarez@biologia.ufrj.br

**Abstract** This paper describes the use of satellite data to examine the relations between annual hydrological cycle and seasonal variations of two TM Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) monthly time data for study year 1997, in sedimentary surface of coastal “tabuleiros” in North of Espírito Santo estate. Using NDVI mean values of different vegetation covers (forest, grassland and cultivated lands), extracted for dry and humid periods of 1997, a vegetated cover coefficient ( $C_V$ ) was calculated for two hydrological basins with different land use patterns. The highest  $C_V$  amplitude occurs in heterogeneous land use basin, derived of greater NDVI seasonal amplitude of grassland and coffee plantations than others ecosystems. The observed amplitude of  $C_V$  is associated with soil moisture and water storage in roots zones of vegetation types with highest amplitude of NDVI.

**Keywords:** remote sensing, NDVI, hydrological cycle.

### 1 Introdução

As paisagens de tabuleiros costeiros do Norte de Espírito Santo, apresentam peculiaridades climáticas e geomorfológicas, determinantes nos processos naturais ocorrentes e nas atividades econômicas da região. A marcada sazonalidade das precipitações e as condições de armazenamento e transporte de água no relevo tabular de rochas sedimentares, determinam um tipo específico de balanço hídrico que controla o funcionamento da cobertura vegetal.

Devido à estas peculiaridades, o principal ecossistema da região, a floresta atlântica de tabuleiros, exibe características semidecíduais, embora em período geralmente muito curto, acarretando uma variação temporal de biomassa, com implicações na dinâmica dos diversos processos biológicos que se processam nesse ecossistema, envolvendo aspectos de estresse hídrico, esclerofilia, decomposição, disponibilização de matéria orgânica, dinâmica da fauna edáfica, dentre outros, acarretando efeitos sobre a diversidade biológica. As restantes formações vegetais, a maioria decorrente de atividades econômicas e com predomínio de culturas de pasto e café, apresentam também uma dinâmica ajustada às fases do ciclo anual. O conhecimento destas variações temporais das formações vegetais e do seu grau de distribuição e ocupação nas bacias hidrográficas, constitui um suporte para o planejamento dos recursos hídricos.

A utilização de imagens de sensores remotos e, em particular, do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), constitui uma ferramenta importante na análise da dinâmica temporal da vegetação, geralmente associada ao ciclo anual. Relações empíricas entre o ciclo climático anual e a variação sazonal do NDVI foi analisado a nível global por Potter & Brooks (1998). Estudos deste tipo existem em regiões semi-áridas da África (Justice *et al.*, 1991; Nicholson & Farrar, 1994) e em ecossistemas brasileiros de cerrado (Assad *et al.*, 1996) e de floresta amazônica (Almeida *et al.*, 1998).

O presente trabalho tem como objetivo analisar as variações de NDVI de duas imagens Landsat5 TM, coletadas em diferentes fases do ciclo anual, comparando as variações específicas das diferentes formações vegetais que recobrem uma superfície de tabuleiros costeiros no Norte de Espírito Santo. Objetiva ainda comparar um índice de cobertura vegetal, obtido a partir do NDVI, com o balanço hídrico de duas bacias hidrográficas com diferentes padrões de uso da terra: uma totalmente coberta por florestas e outra com um mosaico heterogêneo de culturas e ecossistemas naturais.

## 2 Área de Estudo

A área de estudo é uma superfície de tabuleiros costeiros, localizada entre os rios Doce de Barra Seca, limitada pelos paralelos S 18° 53' 53.4" e S 19° 13' 29.0" e os meridianos W 40° 03' 57.2" e W 40° 15' 47.5", no Norte do estado de Espírito Santo (**figura 1**). O relevo de tabuleiros desenvolve-se sobre uma seqüência de depósitos continentais do Terciário Superior, provavelmente Mioceno-Plioceno, composta principalmente por arenitos grosseiros arcoseanos e intercalações de argilitos de forma lenticular. Esta seqüência foi definida por Amador & Dias (1978) como Formação Pedro Canário, estendida entre os rios Mucuri e Itaúnas no Norte do Estado e constitui a unidade basal do Grupo Barreiras.

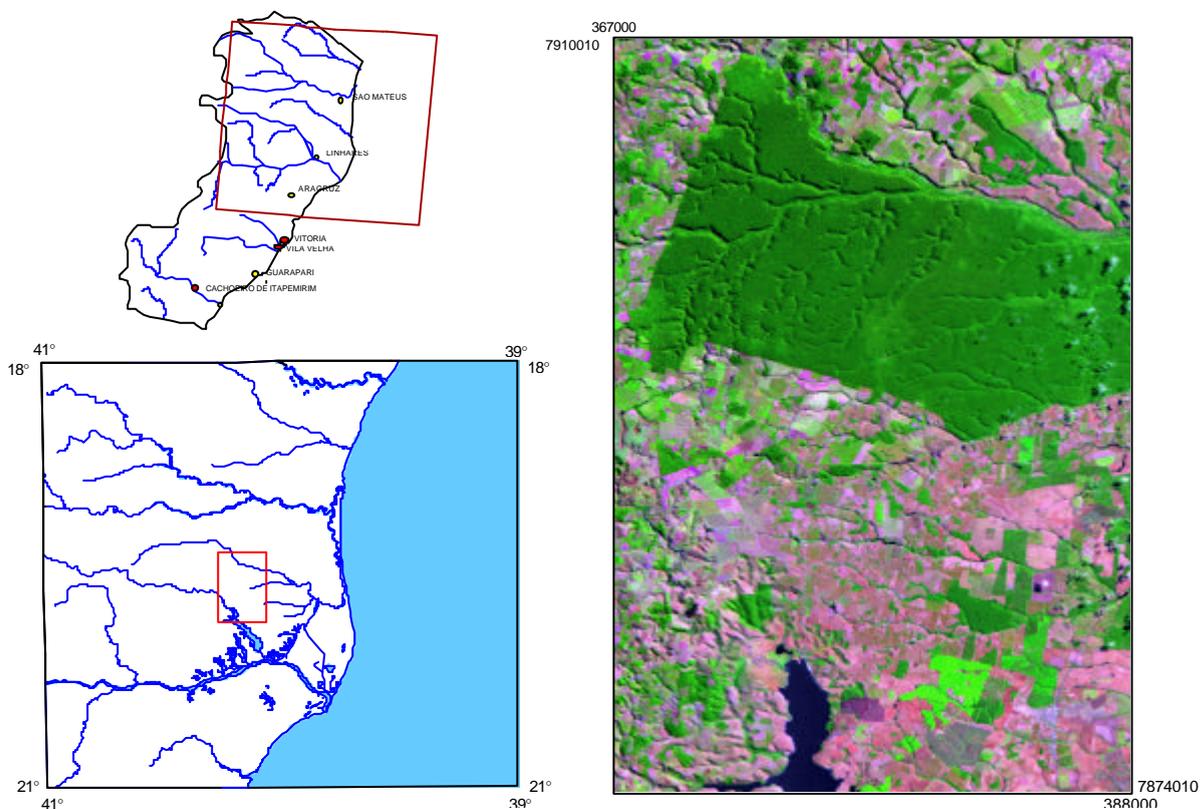


Fig. 1: Área de Estudo

O relevo se distingue pela predominância de feições aplainadas, embora ocorram também áreas dissecadas constituídas de feições de topos convexos e, eventualmente, pronunciados, formando topos e cristas relacionadas com áreas de coberturas rasas e com exposições ocasionais do embasamento cristalino. A maioria das bacias apresenta um padrão de drenagem paralelo, típico das superfícies sedimentares de tabuleiros, onde os rios correm, sem controle estrutural, na direção do mar. Os solos predominantes são os podzólicos amarelos, de textura arenosa média nos interflúvios e topos dos tabuleiros e de textura mais argilosa nos fundos de vales. Nas colinas isoladas de relevo cristalino residual, aparecem latossolos vermelhos escuros. Nos fundos de vales, principalmente perto dos depósitos quaternários marinhos, nas áreas de saturação (várzeas) ocorrem solos hidromórficos indiscriminados.

As condições climáticas são bastante homogêneas em toda a área de estudo. Segundo os dados climáticos da estação agrometeorológica da Fazenda Experimental Sooretama (EMCAPA-ES), a precipitação anual chega a 1178,1 mm/ano, distribuída num período chuvoso de Outubro a Março, com médias de totais mensais variando entre 130 a pouco mais de 200 mm. No período seco, as precipitações não excedem 25% dos totais de precipitação anual, com totais mensais variando entre 40 e 60 mm. Nos últimos anos, as condições de seca vêm se agravando, o que levou a região Norte de Espírito Santo a ser incluída dentro da área de abrangência da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE).

### 3 Materiais e Métodos

Para a realização deste trabalho foram utilizadas as imagens do Landsat-5 TM em formatos digital e em papel, das órbitas 215, ponto 073, quadrante C de 09/09/1997 e 216, ponto 073, quadrante E de passagem 27/05/1997, assim como as folhas topográficas da área, a escala 1:100.000. O processamento digital foi realizado utilizando os sistemas *SPRING/INPE* e *IDRISI/Clark University*.

As aplicações do modelo de mistura espectral ao estudo da vegetação e cobertura do solo vêm-se desenvolvendo de forma notável nos últimos anos, a maioria em áreas florestadas (Adams *et al.*, 1995; Shimabukuro *et al.*, 1997b) e na diferenciação de alvos agrícolas (Moreira *et al.*, 1998; Yi *et al.*, 1998). No modelo, o valor do *pixel* em qualquer banda espectral é considerado como a combinação linear da resposta de cada componente da mistura dentro do *pixel*. Assim, o valor registrado pelo sensor pode ser considerado como a soma integrada das radiâncias dos diferentes materiais que compõem a área imageada (Shimabukuro e Smith, 1991). O modelo pode ser formulado como:

$$r_i = \sum_{j=1}^n (s_{ij}a_j) + e_i$$

$j = 1, \dots, n$  (numero de componentes)

$i = 1, \dots, m$  (numero de bandas)

onde:  $r_i$ : reflectância espectral na banda  $i$

$s_{ij}$ : reflectância espectral para o componente  $j$  na banda  $i$

$a_j$ : proporção do componente  $j$

$e_i$ : erro de estimação na banda  $i$

Neste trabalho são utilizadas as bandas 3, 4, 5 e 7 do Landsat 5 TM. Os componentes discriminados foram “vegetação”, “solo” e “água” (que apresenta um comportamento similar à sombra). Nas imagens-fração correspondentes foi aplicado o algoritmo de segmentação por crescimento de regiões, disponível no *SPRING* e, a seguir, foi executada uma classificação supervisionada por regiões pelo algoritmo de distância de “Battacharya”. A classificação foi

ajustada em campanha de campo através de roteiros de verificação com auxílio de GPS, gerando o Mapa de Uso da Terra.

As imagens-índices de vegetação, baseiam-se no fato da vegetação possuir uma resposta característica nas regiões do espectro eletromagnético relativas ao vermelho e ao infravermelho próximo. Na parte visível do espectro, a clorofila absorve a maioria da radiação do comprimento de onda do vermelho, enquanto que no infravermelho próximo, o parênquima clorofiliano reflete a maior parte da radiação. O contraste entre as duas bandas é representado pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), definido por Rouse *et al.* (1973), obtido pela razão entre a diferença e soma das reflectâncias na região do infravermelho próximo ( $\rho_{INV}$ ) e na região o vermelho ( $\rho_{VER}$ ):

$$NDVI = (\rho_{INV} - \rho_{VER}) / (\rho_{INV} + \rho_{VER})$$

Foram obtidas duas imagens-índices correspondentes aos meses de Maio e Setembro de 1997 (**figura 2**). Para cada uma delas foi feita uma amostragem por extração de valores no IDRISI, tomando como base o Mapa de Uso da Terra e atendendo ao maior grau de certeza com base na campanha de campo. Procura-se que o total das amostras correspondesse à aproximadamente 1% da área de cada classe.

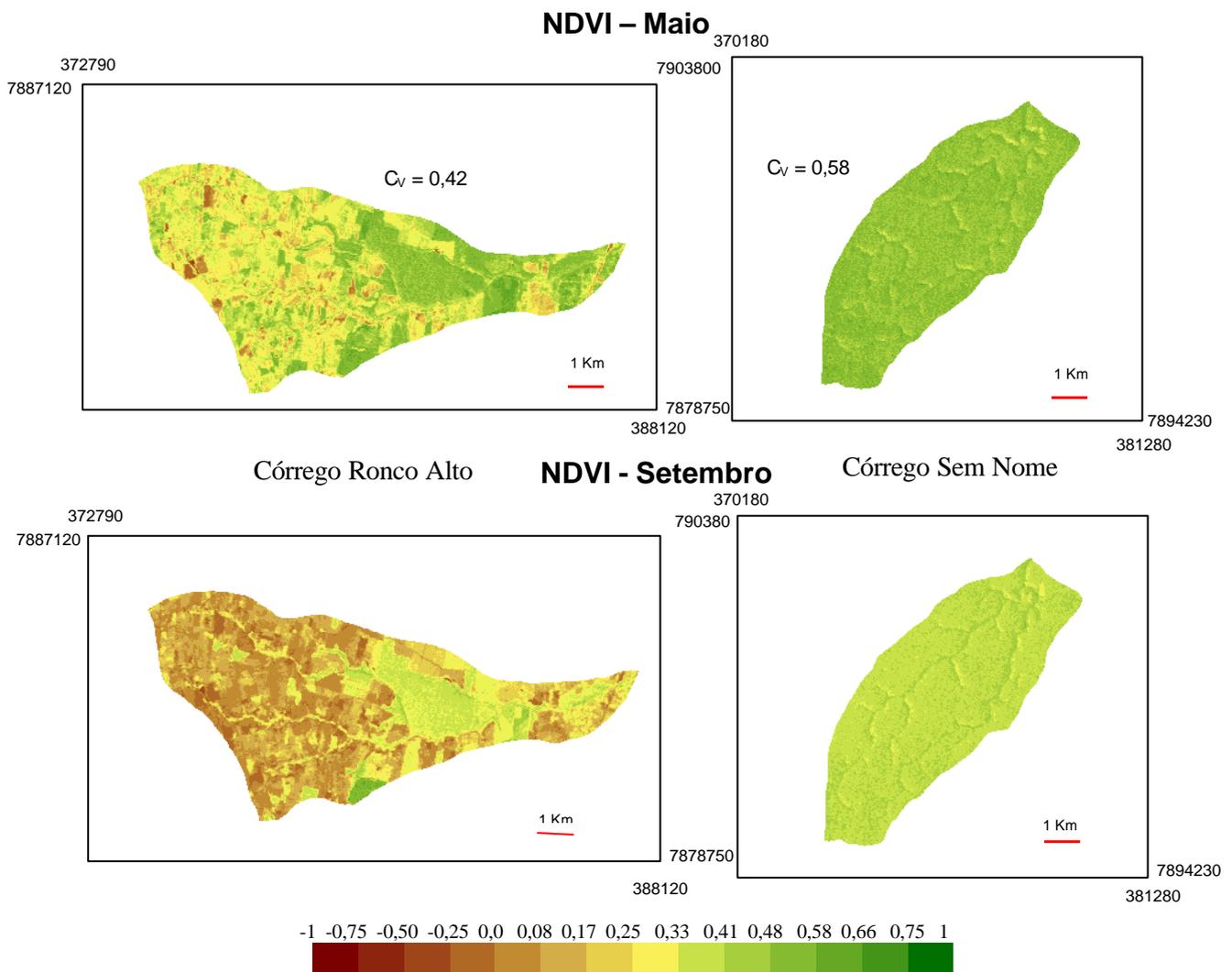


Figura 2: Imagens comparativas de NDVI para maio e setembro de 1997

O balanço hídrico anual foi calculado segundo o modelo de Thornthwaite e Mather (1955), baseado na relação entre os processos opostos de transferência de água da atmosfera para o solo (chuvas, irrigação) e o retorno para a atmosfera através da evapotranspiração. O modelo visa principalmente estimar a disponibilidade de água no solo para a vegetação, tendo como base a capacidade máxima de retenção de água no solo, a qual está em função da textura do solo e profundidade das raízes. Foram estimados os seguintes valores de capacidade máxima de retenção de água, para uma textura arenosa fina (**tabela 1**):

Tabela 1: Potencial de Retenção Hídrica por Tipo de Cultura

	Água disponível (mm/m)	Profundidade média das raízes (m)	Retenção de umidade (mm)
Cultura de raízes superficiais (pastagens, cana)	150	0,50	50
Cultura de raízes de moderada profundidade (café)	150	1,00	150
Cultura de raízes profundas (florestas, eucaliptos)	150	2,00	300

A essência do modelo consiste em subtrair a evapotranspiração dessa capacidade máxima de retenção, enquanto a precipitação é adicionada. A chuva que excede a capacidade de armazenamento é considerada água excedente, incluindo tanto o escoamento superficial como o subterrâneo. Quando os valores de evapotranspiração potencial superam os de precipitação, há utilização da água armazenada no solo, até esgotar a capacidade máxima de água disponível.

Foi calculado o balanço hídrico anual de 1997 para duas bacias hidrográficas com diferentes padrões de uso da terra, visando relacionar o déficit hídrico com as variações do coeficiente de cobertura vegetal. Para o cálculo deste coeficiente em cada bacia são utilizados os valores das imagens NDVI, segundo a equação:

$$C_{vj} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n I_{Vi} S_{ij}$$

onde  $I_{Vi}$  é o valor médio de NDVI da classe  $i$ ,  $S_{ij}$  o percentual em área ocupada pela classe de NDVI na bacia  $j$  e  $n$  o número de classes de NDVI. As classes de NDVI foram estabelecidas por fatiamento do histograma das imagens-índice, com saturação prévia de 1% nas bordas. Ao total foram fixadas 14 classes.

#### 4 Resultados e Discussão

A partir das imagens-índice de vegetação correspondentes aos meses de Maio e Setembro de 1997, que revelaram um decréscimo geral dos valores de NDVI na imagem correspondente ao período seco (Setembro), extraiu-se os valores médios de NDVI para as distintas formações vegetais, bem como a variação sazonal (**tabela 2**).

Tabela 2: Valores Médios e Variação Sazonal de NDVI

Classes	NDVI (médio)		D
	Maio	Setembro	
Floresta Atlântica de Tabuleiros	0,60	0,46	0,14
Complexo de Vegetação de Várzea	0,53	0,28	0,25
Vegetação Hidrófila Herbácea (Nativo)	0,29	0,19	0,10
Eucaliptos	0,62	0,39	0,23
Seringais	0,62	0,61	0,01

Fruticulturas	0,31	0,26	0,04
Plantações de Café	0,48	0,20	0,27
Pastagens	0,36	0,00	0,35
Plantações de Cana de Açúcar	0,44	0,02	0,42
<b>Média</b>	<b>0,47</b>	<b>0,27</b>	<b>0,20</b>

Em geral, o NDVI médio amostrado na imagem de Maio é superior ao amostrado na imagem de Setembro, com valores ao redor de 0,20. A variação das magnitudes das quedas do valor médio de NDVI nas formações vegetais responde a diferentes fatores que correspondem às particularidades fenológicas de cada uma, às condições de umedecimento da paisagem, à capacidade de absorção d'água no solo, à irrigação das culturas, dentre outros.

A reduzida amplitude de NDVI no Seringal deve-se à caducidade em um período muito curto de tempo, ou seja, a seringueira perde todas as folhas em uma específica época do ano que evidentemente não coincidiu com a passagem do satélite. Em relação à cana-de-açúcar, cultura temporária, a grande variação pode ser creditada ao período de safra, quando a cana é queimada e cortada, ou ainda ao fato de no período da pós-colheita, ocorrendo rebrotamento, esta cultura apresenta pouca concentração de biomassa.

Pequenas variações foram registradas em fruticulturas (0,04), representadas principalmente por laranjais, coqueirais e alguns plantios de mamão. O fato responde à adaptação das espécies à seca (como no caso do coqueiro), aos ciclos fenológicos e às boas condições de irrigação, que no caso dos plantios de mamão, utiliza o processo por gotejamento.

A floresta atlântica de tabuleiros apresentou uma diminuição do valor médio de NDVI significativa para ecossistemas naturais, indicando a caducidade deste tipo de formação vegetal e contrastando com resultados obtidos em escala global. DeFries e Townshend (1994) reportaram grandes amplitudes de NDVI para florestas de altas latitudes, enquanto que para florestas tropicais perenifolias são típicos os perfis anuais de NDVI com maior tempo acima do limiar de "vegetação verde" (*greenness*).

Potter e Brooks (1998) concluíram que em regiões cálidas sazonais, o estresse hídrico não contribui de forma substancial para a variação anual do NDVI, explicado pela existência de espécies adaptadas às condições de seca. No entanto, resultados obtidos em condições locais, mostram que o NDVI pode estar fortemente relacionado ao grau de umedecimento da paisagem. Nicholson e Farrar (1994) estimaram uma relação geométrica do NDVI com a precipitação, de forma que esta relação seria forte para valores de precipitação mensal entre 25-200mm, acima dos quais, o NDVI aumenta lentamente ou se mantém constante. A **figura 3** mostra o comportamento das precipitações no ano analisado (1997), evidenciando as condições extremas de seca a que foram submetidas as formações vegetais na área de estudo, com totais mensais abaixo de 200mm.

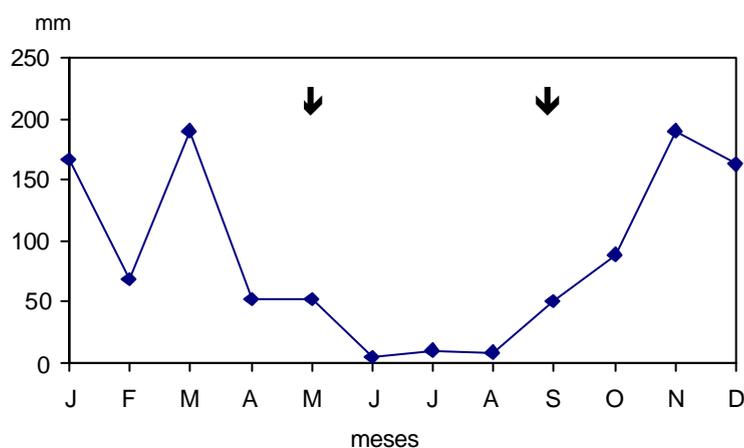


Figura 3: Totais mensais de precipitação em 1997. As setas indicam as passagens do satélite

Pode-se esperar, por tanto, que as condições climáticas e o potencial de armazenamento hídrico na área de tabuleiros costeiros estudada, sejam responsáveis pela amplitude observada nos valores médios de NDVI. Particularmente as culturas de café e pastagens apresentaram variações consideráveis, associadas também às condições de irrigação. Nas áreas de pasto, a pouca profundidade das raízes das gramíneas e a falta de irrigação fazem com que a variação sazonal do NDVI seja muito grande, constituindo um indicador do déficit hídrico em bacias hidrográficas.

Foram gerados modelos de balanço hídrico, elaborados em função da capacidade máxima de retenção de água para diferentes tipos de vegetação no solo franco arenoso fino desenvolvido sobre os depósitos sedimentares terciários que formam os tabuleiros. Na comparação entre os modelos, que correspondem às duas bacias hidrográficas com diferentes padrões de uso da terra, observou-se que o déficit hídrico na bacia do Córrego Ronco Alto, com 43,3% da sua área plantada de café e 20,8% coberta de pastagens, é superior ao da bacia do Córrego Sem Nome, totalmente coberta por floresta

Analisando os coeficientes de cobertura vegetal ( $C_V$ ) para as duas bacias hidrográficas, observa-se como as variações do  $C_V$ , ligadas às variações do NDVI para os diferentes tipos de coberturas, acompanham as amplitudes do déficit hídrico de cada bacia (**tabela 3**).

Tabela 3: Comparação dos coeficientes de cobertura vegetal e o déficit hídrico

Bacias	Maio de 1997		Setembro de 1997		D	
	$C_V$	DEF (mm)	$C_V$	DEF (mm)	$C_V$	DEF (mm)
Córrego Ronco Alto	0,42		0,18		0,24	
Córrego Sem Nome	0,58	7	0,47	31	0,11	24

$C_V$ : Coeficiente de Cobertura Vegetal

DEF: Déficit hídrico

O resultado mostra que as quedas dos coeficientes de cobertura vegetal, em bacias hidrográficas onde predominam formações vegetais com grande amplitude anual de NDVI, acompanha o déficit hídrico, isto é, a quantidade de água disponível no solo para esse tipo de formação é menor pela maior absorção da água em camadas superficiais.

O coeficiente derivado do NDVI pode ser considerado um indicador da variação do balanço hídrico, principalmente do armazenamento d'água no solo e da evapotranspiração real. Bacias com pequenas variações do seu coeficiente de cobertura vegetal indicam altas taxas de transpiração pelas plantas. Quando o  $C_V$  decresce em razões consideráveis, é um sinal de déficit de água disponível na bacia, principalmente para aquelas formações com maior queda do seu valor médio de NDVI.

Cabe inferir que o perfil anual do  $C_V$  acompanha o balanço hídrico, começando a decrescer com certo retardamento, paralelamente à queda dos valores de precipitação em relação aos de evapotranspiração. Este retardamento, pode ser explicado pelo tempo de retirada d'água armazenada no solo. Quando a curva de precipitação ultrapassa novamente a de evapotranspiração, o  $C_V$  deve aumentar em função da reposição de água no solo.

## 5 Conclusões

O trabalho apresenta o potencial de uso de dados de sensoriamento remoto no estudo do comportamento dinâmico das formações vegetais em planícies de tabuleiros costeiros, com clima

sazonal, principalmente nas condições de umidade. A relevância da análise se manifesta na dificuldade de discriminação do comportamento de NDVI em ecossistemas de transição, como florestas secas, pastagens e áreas cultivadas (Potter & Brooks, 1998).

A utilização de um coeficiente de cobertura vegetal ( $C_V$ ), gerado a partir de diferentes classes de NDVI, permite comparar espacial e temporalmente unidades funcionais como as bacias hidrográficas. Bacias com grandes variações no seu  $C_V$  indicam fortes quedas nas taxas de armazenamento de água no solo, na zona de absorção pelas raízes de determinados tipos de cultivos.

As pastagens e o cultivo de café apresentaram maior variação de NDVI e, conseqüentemente, correspondem aos que estão sofrendo um maior estresse hídrico. A extensão que ocupam e as limitações na disponibilidade de recursos hídricos nos tabuleiros, são responsáveis pelas dificuldades na irrigação desses cultivos. As bacias com grande parte da sua área ocupada por pastagens e/ou café, apresentam os menores valores e as maiores amplitudes do seu coeficiente de cobertura vegetal ( $C_V$ ).

A floresta atlântica de tabuleiros apresentou uma amplitude considerável do NDVI, mostrando a caducidade deste ecossistema como adaptação às condições de estresse hídrico.

## Referências

- Adams J.B., Kapos V., Sabol D.E., Kapos V., Almeida Filho R., Roberts D.A., Smith M.O., Gillespie A.R. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, **52(2)**, pp 137-154, 1995
- Almeida, E.S.; Batista, G.T. Índice de vegetação versus precipitação na Amazônia. *Anais do IX Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, SP, 1998. INPE, São José dos Campos, SP, CD-ROM, 1998.
- Amador, E.S.; Dias, G.T.M. Considerações preliminares sobre depósitos do terciário superior do Norte do Espírito Santo. *An. Academia Brasileira Ciências*. **50 (1)**, pp 121 – 132, 1978.
- Assad, E.D.; Castro, L.H.R.; Almeida, S.A.O. Análise exploratória da variação espaço temporal do índice de vegetação NOAA/AVHRR e pluviometria: caso dos cerrados brasileiros. In: *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador, BA, 1996. INPE, São José dos Campos, SP, CD-ROM, 1996.
- Justice, C.O.; Dugdale, G.; Townshend, J.R.G.; Narracott, A.S.; Kumar, M. Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development in semi-arid West África. *International Journal of Remote Sensing*, **12(6)**, pp 1349-1368, 1991.
- Moreira M.A., Aulicino L.C.M., Shimabukuro Y.E., Duarte V., Rudorff B.F.T., Yi J.L.R., Souza I.M. Modelo de mistura espectral para identificar e mapear áreas de soja e milho em quatro municípios do estado de Minas Gerais. *Anais do IX Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, SP. INPE, CD-ROM, 1998
- Nicholson, S.E.; Farrar, T.J. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semi-arid Botswana. *Remote Sensing of Environment*, **50**, pp 107-120. 1994.
- Potter, C.S.; Books, V. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, **19(15)**, pp 2921-2948, 1998.

- Rouse J.W.Jr., Haas R.H., Deering D.W., Schell J.A., Harlan J.C. *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green wave Effect) of Natural Vegetation*. NASA/GSFC. Type III Final Report, Greenbelt, MD, 371p, 1974.
- Shimabukuro Y.E., Mello E.M.K., Moreira J.C., Duarte V. *Segmentação e classificação da imagem sombra do modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia*. INPE, São José dos Campos, 16p. (INPE-6147-PUD/029). 1997b
- Shimabukuro Y.E., Smith J.A. The least square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **29(1)**, pp 16-20, 1991.
- DeFries R., Townshend J. NDVI-derived land cover classification at global scales. *International Journal of Remote Sensing*, 15, pp 3567-3586, 1994.
- Yi J.L.R., Aulicino L.C.M., Shimabukuro Y.E., Rudorff B.F., Duarte V., Moreira M.A., Martini P.R., Souza I.M. Segmentação de imagens-fração derivadas do sensor TM-Landsat para mapeamento do uso do solo no município de Sapezal (MT). *Anais do IX Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, SP*. INPE, CD-ROM, 1998.