

E. M. L. Moraes Novo e A. P. dos Santos

Instituto de Pesquisas Espaciais

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Caixa Postal 515, 12200 - São José dos Campos, SP, Brasil

#### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi demonstrar como os dados temporais do LANDSAT poderiam auxiliar na análise do fenômeno da inundação, bem como no levantamento de seus condicionantes naturais. A região do baixo vale do rio Doce foi escolhida como área de estudo em virtude da ocorrência de enchentes catastróficas no período de dezembro/1978 a março/1979. O mapeamento geomorfológico permitiu levantar os fatores morfoestruturais que poderiam explicar a ocorrência de enchentes em determinados trechos do rio. Três unidades foram obtidas: área de dissecação em colinas, área de dissecação em cristas, e áreas de planícies aluviais e deltaicas. Foram identificadas também estruturas circulares positivas (morros) e negativas (depressões), escarpas erosivas e linhas de controle estrutural. O classificador MAXVER foi usado na análise automática para a classificação temática no IMAGE-100, resultando em 7 temas no período seco e 9 no período chuvoso. A avaliação do perímetro úmido do canal permitiu estimar a magnitude das modificações na vazão do rio de um período para outro.

#### ABSTRACT

The objective of this research was to verify the applications of temporal LANDSAT data on study flood and to survey the natural features responsible for this phenomenon. Doce river valley was chosen as study area due to the catastrophic flood episode occurred during the period from December/1978 to March/1979. Visual analysis of MSS/channel 7 allowed geomorphological mapping in order to evaluate morphostructural features related to the flood. Three geomorphological units were obtained: hilly area, sharp watershed area, alluvial and deltaic plains. Relief forms such as mountain, depression, erosional scarps and structural control were also analysed. MAXVER classifier was used for thematic classification in the IMAGE-100 system. This analysis derived 7 and 9 classes of water surface features for dry and rainy season, respectively. The evaluation of wet perimeter permitted to estimate the magnitude of the changes from pre-flood to pos-flood stage.

#### 1. INTRODUÇÃO

Durante os meses de dezembro/1978 e janeiro/fevereiro/março/79, a região do médio e baixo rio Doce sofreu inúmeros danos, em virtude da ocorrência de enchentes. Embora a ocorrência de enchentes não seja rara na região, como é o caso da enchente de 1934 (Deffontaines, 1944), que provocou um aumento de 6 metros no nível das águas na região de Colatina, as enchentes atuais parecem ter alcançado dimensões maiores do que as anteriores.

Segundo Botelho (1977), o regime hidrológico do rio Doce representa uma transição do tipo subequatorial para o tropical. Em Colatina, o rio apresenta um ressalto próximo à época de precipitação máxima. Já no médio curso,

antes de o rio Doce receber um de seus mais importantes afluentes, o rio Suaçui-Grande, a cheia prolonga-se além da época das maiores precipitações.

Deve-se distinguir entre a situação de "cheia", em que há um período de vazão segundo o regime do rio, e a situação da "inundação" ou "enchente", em que a alta do rio, ou seja, a fase de cheia ou vazões máximas, determina débitos que provocam o transbordamento da água além das margens do canal fluvial, alagando as terras adjacentes. Para Wisler e Brater (1964), todas as inundações são originariamente decorrentes do aumento do escoamento superficial, provocado por uma intensificação na precipitação.

O escoamento superficial de um curso d'água é determinado por dois conjuntos de fatores in

teiramente diferentes, um dos quais depende das características físicas da bacia. Dentre os fatores climáticos que afetam de forma mais crítica o escoamento fluvial, destacam-se o tipo de precipitação, a intensidade das chuvas, a duração da precipitação e sua distribuição dentro da bacia hidrográfica. Dentre as características físicas da bacia, os fatores que mais afetam o escoamento superficial são o tipo de solo, a área e a forma da bacia, e a declividade e a orientação das vertentes.

O uso da terra, dentro da bacia hidrográfica, também é um dos fatores mais importantes na determinação das variações na hidrógrafia de um curso d'água.

No caso específico do rio Doce, pode-se considerar que existe uma série de fatores que favorecem a ocorrência de inundações. A região do vale do rio Doce caracteriza-se, clinicamente, pela tropicalidade, com duas estações bem definidas e um período chuvoso com máximas de verão. Em geral, o período seco é mais prolongado nas áreas interiores da bacia, estendendo-se de maio a setembro (Nimer, 1977). No que se refere à estação chuvosa, também existe uma diferença entre os meses mais chuvosos do alto curso (novembro, dezembro e janeiro) e os do baixo curso do rio Doce (outubro, novembro e dezembro). As características climáticas determinam um coeficiente de distribuição de precipitação caracterizado pela extrema concentração de chuvas, o que favorece um aumento do escoamento superficial nos meses de verão, ocasionando inundações. Quando a precipitação é distribuída uniformemente pela bacia durante o ano, esta é menos sujeita a inundações.

Quanto às características físicas, a bacia do rio Doce apresenta uma extensa área de drenagem com um formato que, segundo Wisler e Brater (1964), favorece a ocorrência de inundações. Segundo estes autores, quando o fator "forma" é alto, há maior probabilidade de ocorrência de inundações. Esse fator é dado pela razão entre a largura média da bacia e o comprimento do seu eixo. Bacias alongadas, como a do rio Doce, fazem com que o caminho que a água percorre entre as vertentes e o canal principal seja menor, facilitando a rápida concentração das águas.

A declividade de uma bacia hidrográfica tem uma relação importante e complexa com: a infiltração, o escoamento superficial, a umidade do solo e a contribuição da água do solo para o rio. Via de regra, há uma tendência de aumento no escoamento superficial em áreas de declividades elevadas. No caso da bacia do rio Doce, sabe-se que ela se caracteriza, em geral, por um relevo acidentado.

Outra característica importante que condiciona a maior probabilidade de inundações é

a disposição, em planta, dos leitos naturais. Quanto mais drenada for a bacia, mais eficiente será o escoamento da água e mais rápida a repercussão do efeito da precipitação na vazão do rio (Wisler e Brater, 1964). A bacia do rio Doce caracteriza-se pela alta densidade de drenagem, o que torna mais eficiente a concentração das águas no canal principal.

No que se refere ao uso da terra, observa-se que grande parte da bacia do rio Doce encontra-se sem uma cobertura vegetal densa, o que favorece o escoamento superficial.

O conhecimento dos condicionantes naturais das inundações pode auxiliar na tomada de decisões que evitem maiores prejuízos e que, de alguma forma, previnam catástrofes.

Neste contexto, a tecnologia de sensoriamento remoto orbital pode constituir um instrumento útil para o estudo dos condicionantes físicos das inundações e de sua dinâmica. O caráter repetitivo da cobertura do sistema LANDSAT favorece a avaliação das proporções do fenômeno de inundação, bem como das alterações ambientais dentro da área de ocorrência das enchentes.

O objetivo deste trabalho foi verificar que tipo de informações poderiam ser extraídas da análise automática de dados do LANDSAT, que permitissem uma melhor compreensão do fenômeno de inundação ocorrido no médio-baixo vale do rio Doce durante o verão de 1978/1979.

Este trabalho tem um caráter especulativo e visa mais levantar hipóteses do que chegar a conclusões definitivas, uma vez que foram analisadas imagens de uma época passada, não sendo possível a obtenção de informações de campo que apoiassem as interpretações feitas sobre as imagens.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 - ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o trecho do vale do rio Doce que se estende de Governador Valadares (MG) até a sua desembocadura, no litoral do Estado do Espírito Santo.

Segundo Lamego (1946), a geologia da região cortada pelo rio Doce é bastante complexa, com ajustamento dos cursos d'água à direção das camadas. Os rios apresentam corredeiras e cachoeiras no alto curso. Ocorrem fraturas que condicionam o curso do rio Doce a jusante de Governador Valadares.

A geologia da região é caracterizada pela presença de terrenos pré-cambrianos (xistos, biotita-gnaisses, granitóides). Localmente ocorrem gnaisses com charnockitos que repre

sentam áreas mais influenciadas por tectonismo e dão uma topografia mais saliente, caracterizada por cristas e serras. Ocorrem, também, áreas de granitóides, onde a morfologia comum é a de "pães-de-açúcar". No baixo curso do rio Doce ocorrem relevos tabuliformes, esculpidos em rochas da Formação Barreiras, com drenagem subparalela e angular, caracterizada por vales afogados na proximidade do delta e pelo desenvolvimento de planície de colmatação. Na zona deltaica, os sedimentos são de origem flúvio-marinha e se dividem em 2 tipos de terrenos: terras baixas, sempre imersas, formadas pela planície de cordões litorâneos; e as terras baixas, periodicamente imersas, formadas por baixos terraços fluviais e marinhos (Soares e Landim, 1977).

As terras altas modeladas em rochas do pré-cambriano caracterizam-se pela presença de vales encaixados, perfil longitudinal com rupturas de gradiente, padrão de drenagem dendrítico-retangular e manto de intemperismo intenso (Soares e Landim, 1977).

Sob o ponto de vista de solos, ocorrem basicamente latossolos vermelho-amarelos, de textura argilosa, correspondentes às áreas de topografia mamelonar, e podzólicos vermelho-amarelos, de textura argilosa, nas áreas de maior dissecação pela drenagem (DNPM, 1978).

## 2.2 - MATERIAL

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas imagens do LANDSAT, na escala de 1:500.000, nos canais 5 e 7, e fitas compatíveis com o computador, em épocas diferentes: órbita 359, ponto 26 de 22.06.77 e 27.03.79; órbita 122, ponto 25 de 15.07.77 e 27.04.79.

Utilizou-se, também, o Sistema de Classificação Automática de Imagens Multiespectrais (IMAGE-100) para a determinação das variações da lâmina de água e suas características no tempo. O sistema IMAGE-100 encontra-se descrito no manual do usuário da General Electric (1975).

## 2.3 - ANÁLISE VISUAL

A análise visual de imagens do LANDSAT foi feita dividindo-se a área ao longo do rio Doce em nove módulos. Para cada módulo foi feito um esboço de compartimentação geomorfológica para caracterizar as condições topográficas nas imediações do rio Doce.

Para essa compartimentação utilizou-se o canal 7, na escala de 1:500.000, seguindo-se a metodologia já descrita em Santos et alii (1980). A metodologia utilizada caracteriza as principais formas de dissecação e acumulação na área de estudo.

## 2.4 - ANÁLISE AUTOMÁTICA

A análise automática foi realizada através da divisão da área de estudo em nove módulos, que foram ampliados para a escala de 1:100.000. Como a pesquisa visava a comparação do comportamento do rio Doce em duas estações, houve necessidade de proceder à superposição de cada um dos nove módulos nas duas datas. A área recoberta em cada módulo equivale a aproximadamente 530 km<sup>2</sup>.

Para a classificação dos temas a serem analisados, utilizou-se o programa MAXVER (Velasco et alii, 1978). Para o cálculo de área de cada tema foi utilizado o programa "AREA" implementado no IMAGE-100 (General Electric, 1975).

Os módulos foram numerados de I a IX, a partir do litoral, nas duas épocas analisadas. A legenda desenvolvida não foi necessariamente a mesma para as duas épocas, variando em função das modificações das características da lâmina de água de uma estação para outra. No procedimento de análise, trabalhou-se sempre com dois módulos referentes à mesma área, classificando-se primeiro os temas da estação seca, e, depois, os da estação chuvosa.

A coleta de amostras de treinamento foi realizada levando-se em conta o conhecimento teórico do comportamento espectral da água, já previamente estabelecido em trabalhos anteriores (Ritchie et alii, 1974; Robinove, 1978; Herz, 1977; Sausen, 1981) devido à impossibilidade de informações de campo, referentes às datas das imagens trabalhadas.

Para a análise do comportamento espectral da água nas estações seca e chuvosa, foram utilizados os programas "SINGLE-CELL" e "SINGLE PIXEL TRAINING" para a coleta dos valores de níveis de cinza nos canais 4 e 5 do MSS/LANDSAT. Os canais 4 e 5 das imagens correspondentes à época de vazante foram carregados nos canais 1 e 2 do IMAGE-100, e os canais 4 e 5 das imagens correspondentes à época cheia foram carregados nos canais 3 e 4 do IMAGE-100.

Para cada amostra obtida ao longo do rio foram coletadas as coordenadas da imagem nas duas estações, de modo que houvesse condições de posicioná-las nas imagens do LANDSAT, na escala de 1:500.000. Este posicionamento permitiu a construção de gráficos e perfis que serviram para avaliar a variação das características da água com o distanciamento das cabeceiras.

As amostras foram posicionadas, em geral, na porção central do canal, próximo às confluências dos principais afluentes que abastecem o rio Doce, e nas áreas em que havia bruscas mudanças de direção do canal fluvial. O número de

amostras, por módulo, variou de 3 a 9 em função da maior ou menor variabilidade das características do rio, dentro de um mesmo módulo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 - ANÁLISE VISUAL

A análise visual das imagens do LANDSAT permitiu a compartimentação da área de estudos em três grandes conjuntos morfológicos: áreas de dissecação em colinas, áreas de dissecação em cristas e área de planícies aluviais e deltaicas. Puderam, ainda, ser identificadas áreas de estruturas circulares positivas (morros) e negativas (depressões), bem como escarpas erosivas e principais linhas de controle estrutural do relevo.

O objetivo desse esboço da geomorfologia foi verificar em que medida a presença de um determinado compartimento topográfico, na região adjacente ao rio, poderia estar influenciando as taxas de variação da lâmina d'água nos períodos de análise.

Pela análise do esboço geomorfológico (Figura 1), observa-se que o canal do rio Doce apresenta, no trecho compreendido entre Governador Valadares e sua foz, mudanças bruscas de direção. A montante de Governador Valadares, a direção do rio é aproximadamente sudoeste-nordeste; na altura da cidade o rio passa a correr aproximadamente na direção leste-oeste. No cotovelo formado pela mudança de direção, ocorre uma estrutura circular positiva associada ao Pico de Ibituruna, formado por um corpo intrusivo granítico que se encontra controlado por falhamentos de direção N-NW (DNPM, 1978). Em virtude da mudança de direção e consequente redução na velocidade de escoamento das águas fluviais, nesse trecho há formação de uma estreita área de acumulação de sedimentos.

Na região adjacente ao canal (módulo IX), predomina um relevo caracterizado pela dissecação em colinas. O padrão fotográfico com alta rugosidade sugere a presença de uma drenagem superficial bastante densa.

Esses aspectos mencionados podem ser utilizados para explicar a ocorrência de enchentes na região de Governador Valadares. Nas proximidades desta cidade, o canal fluvial alarga-se, mantendo um padrão ramificado, alargamento esse atribuído a uma redução do gradiente após a soleira de Cadeia Escura.

A jusante do rio Suaçuí-Grande, o rio Doce torna a mudar bruscamente de direção, tomando rumo SE até a cidade de Aimorés.

No módulo VIII ocorre, ainda, como unidade de dissecação dominante, o relevo de colinas, aparecendo localmente uma unidade de cristas, provavelmente associada a controle estrutural de direção N-NW. Neste módulo a unidade de colinas encontra-se desdobrada em dois patamares altimétricos, articulados por escarpa erosiva, que funciona como dispersora de água de numerosos afluentes da margem esquerda do rio Doce.

Nos módulos VI e V o rio Doce torna a mudar de direção, seguindo, a partir de Aimorés, rumo E. De Governador Valadares a Aimorés o rio Doce se mantém, em geral, com uma largura constante; a jusante de Aimorés, o canal sofre um estreitamento acentuado que coincide com a ocorrência de rochas do complexo charnockítico, o qual também se associa à unidade de cristas que dominam toda a extensão do módulo V. Esse estreitamento do canal do rio Doce poderia servir, inclusive, de critério para a identificação de rochas do complexo charnockítico, uma vez que, devido à extrema resistência à erosão, em áreas em que ocorrem, o rio não tem condições para alargar o seu canal.

Na confluência do rio José Pedra (ou Guandu) como o rio Doce encontra-se as cidades de Aimorés e Baixo-Guandu, que, por ocasião da última inundação, foram submersas pelo extravasamento das águas fluviais. No baixo curso do rio José Pedra, ele se apresenta visivelmente controlado pela direção E, que orienta também o baixo curso do rio Doce. A presença dessa direção associada ao estreitamento do canal a jusante pela estrutura charnockítica, funciona como um sistema de represamento de água. O rio Doce que mantém, até o módulo VI, uma seção transversal característica de canal largo passa a ter um estrangulamento no seu leito. A água que fluía num leito largo, a uma dada velocidade, sofrerá um retardamento, tendendo a compensar a perda de largura do canal com um aumento na profundidade da lâmina de água a montante. Como o processo de enchente é de baixa frequência, este aumento de profundidade não se faz pelo desgaste do fundo do canal, mas sim pelo transbordamento.

Além do estreitamento do rio Doce, condicionado pela geologia, outros fatores que contribuem para agravar o problema de inundação na área são a contribuição de débito do rio José Pedra, que é um dos principais afluentes do rio Doce, e a própria mudança de direção do canal. Além disso, o módulo VI se caracteriza pela diminuição da dissecação em colinas, já anteriormente associada a um padrão de drenagem superficial densa.

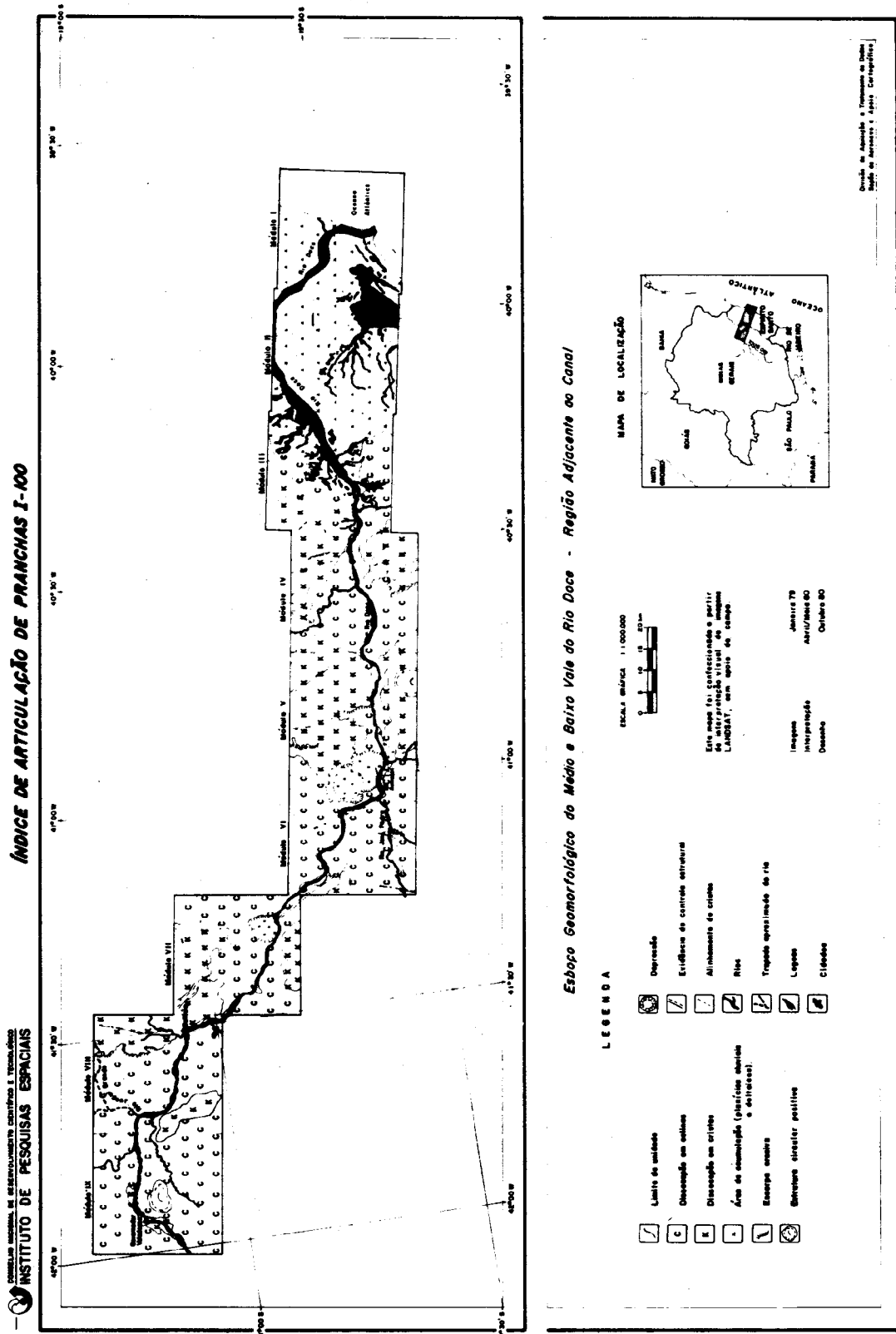


Fig. 1 - Esboço geomorfológico do médio e baixo vale do rio-Doce - região adjacente ao canal.

Nessa área ocorre, também, uma estrutura circular, com diâmetro aproximado de 12 km em rochas do complexo charnockítico que se encontra associada à mudança de direção do rio Doce. No interior dessa estrutura desenvolveu-se uma área de acumulação de sedimentos mais recentes, caracterizada, na imagem do canal 7, por um padrão de textura bastante lisa.

A partir do módulo III, o rio Doce já passa a atravessar rochas da Formação Barreiras e sedimentos flúvio-marinhos quaternários subatuais e atuais. Esta unidade se caracteriza por relevo pouco acidentado, baixas colinas, lagoas de represamento, tabuleiros de pouca altitude e cordões arenosos litorâneos.

Nessa região é importante salientar o papel das lagoas de represamento como reguladoras da vazão do rio Doce no seu baixo curso (Soares e Landim, 1977).

### 3.2 - ANÁLISE AUTOMÁTICA

#### 1) Divisão da área de estudo em módulos

Para facilitar a comparação das imagens do período anterior às enchentes, a região de estudo foi dividida em nove módulos, de jusante para montante. Todos os módulos referentes aos dois períodos estudados foram ampliados para a escala de 1:100.000. Após a ampliação, para uma determinada época, procedeu-se à superposição do módulo referente à outra época.

Para a superposição dos módulos, os canais 5 e 7 da época seca foram carregados nos canais 1 e 2 do IMAGE-100, o mesmo ocorrendo com os da época pós-enchente, que foram carregados nos canais 3 e 4 do Image 100. Este procedimento foi repetido para os nove módulos analisados.

Utilizando-se o rio Doce como referência, a superposição foi realizada através de sucessivas tentativas de fazer coincidir a posição do leito do rio com a dos principais acidentes geográficos nas duas épocas. Como os módulos definidos para as duas estações possuíam o mesmo número de "pixels", a superposição foi obtida com bom grau de coincidência.

Devido às diferenças de azimute, ângulo de elevação solar e posicionamento do satélite, ocorreram distorções geométricas de uma passagem para outra, prejudicando a superposição dos módulos.

#### 2) Classificação das características da lâmina de água

Para a classificação das características da lâmina de água dos módulos, foi utilizado o algoritmo MAXVER (Velasco et alii, 1978). A coleta de amostras de treinamento se baseou no conhecimento teórico sobre o comportamento espectral da água. Após a aquisição das amostras de treinamento, foi feita a análise da matriz de classificação. Em função dos resultados obtidos, procedeu-se à análise das amostras, subtraindo-se delas as irrelevantes, e adicionando-se-lhes novas amostras de treinamento; desta maneira, o processo de classificação foi refinado.

A legenda foi definida para cada módulo, em função das peculiaridades por eles apresentadas. Em geral, no período de pré-enchente foram identificadas as seguintes classes:

- água de rio com baixa concentração de sedimentos (rio Doce);
- água de rio com sedimentos (rio Doce);
- águas costeiras sujeitas à descarga do rio Doce;
- banco de areia;
- água lacustre com baixa concentração de sedimentos;
- água de afluente;
- cidade.

No período de pós-enchente foram identificadas, além das acima mencionadas, com exceção da classe "banco de areia", as seguintes classes:

- umidade ao longo do rio Doce;
- umidade ao longo de afluentes do rio Doce;
- solo.

As classes "água com baixa concentração de sedimentos" e "água com sedimentos" foram agrupadas numa única classe "água do rio Doce", pois no período pós-enchente os sedimentos se apresentaram uniformemente distribuídos na lâmina de água.

Através do programa "CÁLCULO DE ÁREA", implementado no IMAGE-100, foram obtidos os valores de área de cada tema classificado (Tabela I).

TABELA 1

VALORES DA ÁREA (km<sup>2</sup>) DOS TEMAS CLASSIFICADOS

MÓDULO	ÁREA EM KM <sup>2</sup>														
	PERÍODO DE PRÉ-ENCHENTE							PERÍODO DE PÓS-ENCHENTE							
	ÁGUA COM BAIXA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS	ÁGUA COM SEDIMENTOS	ÁGUAS COSTEIRAS	BANCO DE AREIA	ÁGUA LACUS TRE COM BAIXA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS	CIDADE	ÁGUA DO AFLUENTE	ÁGUA DO RIO	ÁGUAS COSTEIRAS	ÁGUA LACUS TRE COM BAIXA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS	UMIDADE DE RIO	CIDADE	SOLO	ÁGUA DE AFLUENTE	UNIDADE DO AFLUENTE
I	10,458	11,403	8,230	4,904	-	-	-	22,791	106,681	-	-	-	-	-	-
II	11,023	-	-	1,735	7,797	-	-	13,797	-	7,740	49,056	-	-	-	-
III	13,172	6,016	-	1,954	22,877	-	-	20,916	-	31,148	20,382	-	-	-	-
IV	15,969	-	-	0,416	-	-	-	17,206	-	-	28,657	-	-	-	-
V	8,548	-	-	-	-	-	-	10,902	-	-	0,980	-	-	-	-
VI	14,442	5,610	-	-	-	-	2,897	17,603	-	-	11,127	-	-	2,338	3,868
VII	7,348	-	-	0,555	0,482	-	-	11,765	-	0,882	5,308	-	-	-	-
VIII	15,071	-	-	5,365	-	-	-	20,246	-	-	22,464	-	-	-	-
IX	15,407	-	-	1,513	-	8,418	-	18,276	-	-	16,642	7,643	4,728	-	-

Pela análise da Tabela 1 observa-se que, do período pré para o pós-enchente, não existe mais distinção entre água com diferentes níveis de concentração de sedimentos em suspensão, e que a classe "banco de areia" desapareceu. A área ocupada pela cidade Governador Valadares (módulo IX) diminuiu de um período para o outro, provavelmente porque trechos inundados passaram a apresentar resposta espectral semelhante à das áreas úmidas e alagadas. A classe "umidade do rio Doce", que não existia no período pré-enchente, passou a ocupar 16,642 km<sup>2</sup> no período de pós-enchente. As Figuras 2 e 3 mostram a classificação temática do módulo IX nos períodos de pré e pós-enchente, respectivamente.

No módulo I pode-se observar que a classe "águas costeiras sujeitas à descarga do rio Doce" aumenta de 8,230 km<sup>2</sup> para 106,681 km<sup>2</sup>, indicando que, com o aumento da vazão líquida/sólida do rio Doce, sua influência sobre a zona costeira torna-se muito grande. Este fenômeno, provavelmente, tem contribuído para a expansão do seu delta durante o quaternário recente (holoceno).

A classe "umidade", que não existe no período de pré-enchente, é encontrada em todos os módulos, com exceção do I, no período

de pós-enchente. O comportamento da classe "umidade" varia em função das características geomorfológicas dos módulos. Nos módulos em que o condicionamento estrutural e litológico determinam um estreitamento do canal fluvial, como por exemplo nos módulos V e VII, esta classe ocupa uma pequena extensão em área. Nas áreas baixas, formadas por planícies e tabuleiros, esta classe adquire grande expressão em área, ocupando no módulo II, por exemplo, 49,056 km<sup>2</sup>.

De modo a avaliar o comportamento da lâmina de água de um período para outro, os diferentes tipos de água foram agrupados para formar o perímetro úmido do rio.

O perímetro úmido aqui definido representa o produto da largura do canal pelo seu comprimento. Em geomorfologia, o perímetro úmido de uma seção transversal do rio é o produto da largura do canal pela sua profundidade. O perímetro úmido permite estimar a vazão de um rio se as características de profundidade do canal são conhecidas. Uma vez que, segundo Leopold e Maddock (Christofolletti, 1974), o débito de um rio é igual ao produto da largura pela profundidade e velocidade médias da água do rio, um aumento da largura do canal do rio (lâmina d'água) resultará em um aumento no seu débito, mesmo não havendo alteração nos outros parâmetros.

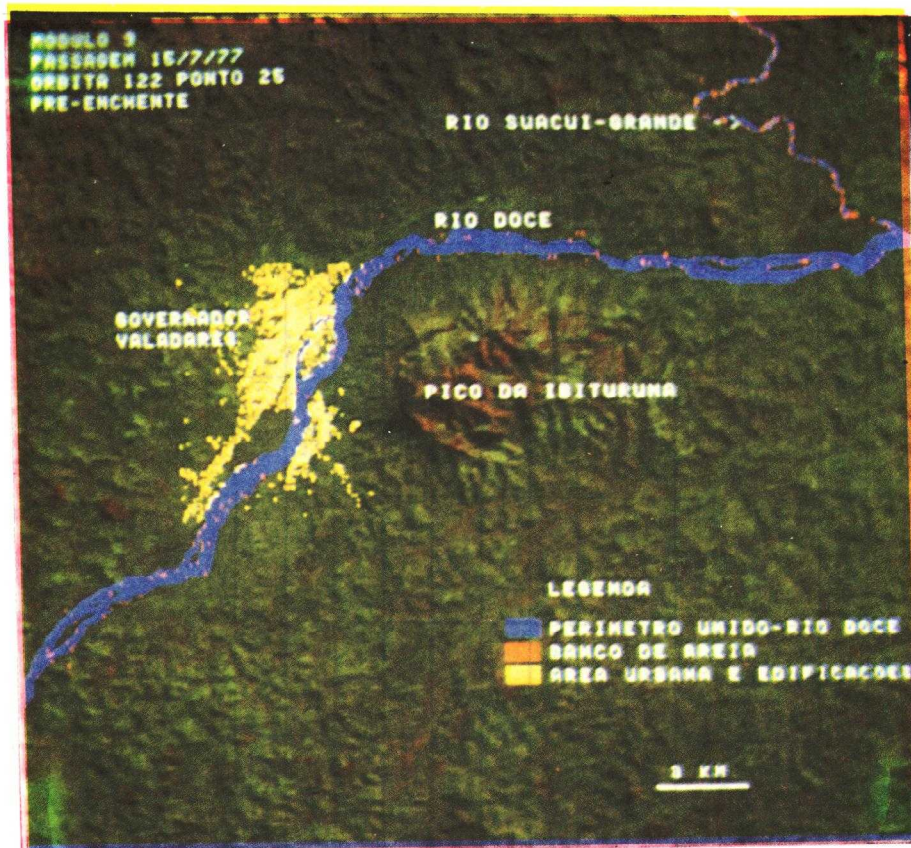


Fig. 2 - Classificação temática do módulo IX - período de pré-enchente.



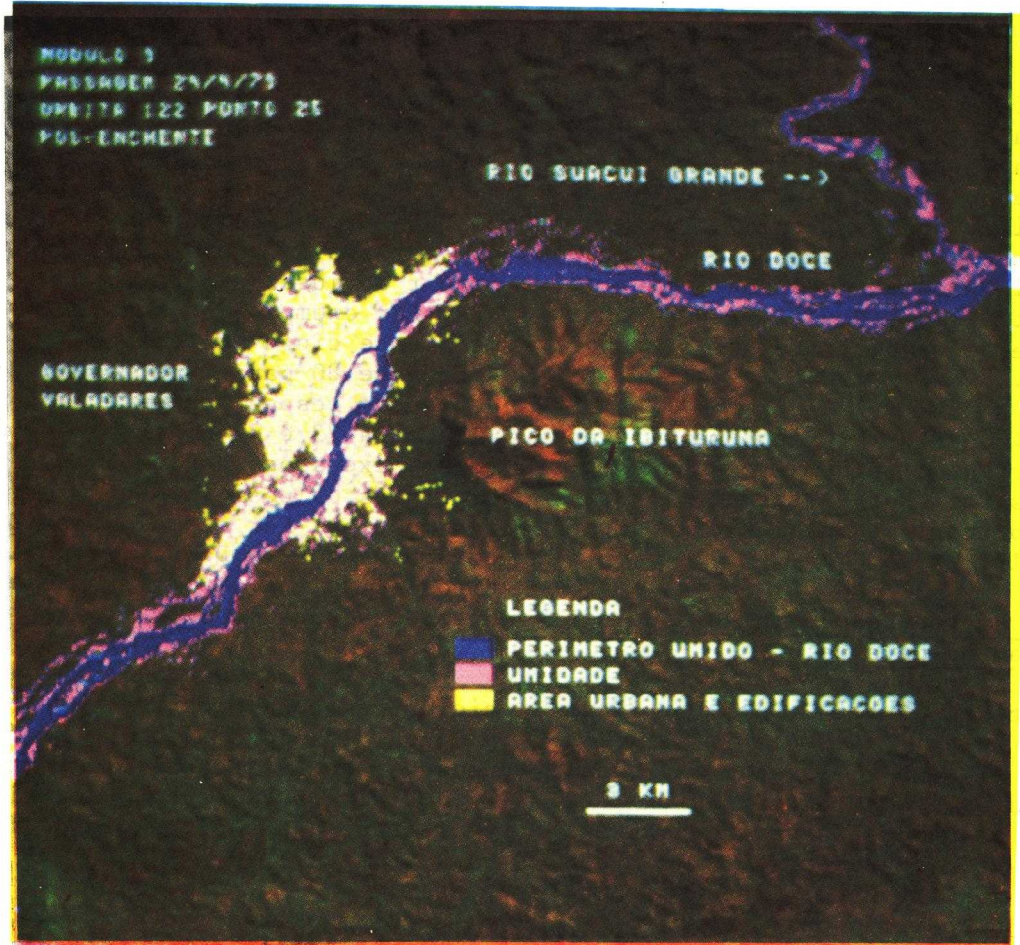


Fig. 3 - Classificação temática do módulo IX - período de pós-enchente.

Desta forma, a avaliação do perímetro úmido do canal fornece uma estimativa da magnitude das modificações na vazão de um período para outro. A Tabela 2 resume os dados do perímetro úmido dos períodos de pré e pós-enchente.

Observa-se que, de um modo geral, em todos os módulos houve um aumento no perímetro úmido do período pré para o pós-enchente, com exceção do módulo VI (Tabela 2). Os dados referentes a este módulo foram prejudicados na comparação pela cobertura de nuvens no período de pós-enchente.

TABELA 2  
PERÍMETRO ÚMIDO DO CANAL EM KM<sup>2</sup>

MÓDULOS	PERÍODO DE PRÉ ENCHENTE (1)	PERÍODO DE PÓS ENCHENTE (2)	DIFERENÇAS (2) - (1)
I	21,861	22,791	0,930
II *	11,023	13,797	2,774
III	19,188	20,916	1,728
IV	15,969	17,206	1,237
V	8,548	10,902	2,354
VI (**)	20,152	17,603	-2,529
VII	7,348	11,765	4,417
VIII	15,071	20,246	5,175
IX	15,407	18,276	2,869

\* Este módulo inclui apenas parte do rio Doce.

\*\* Este módulo foi prejudicado, no período de pós-enchente, pela cobertura de nuvens e por ruídos na CCT.

A maior diferença encontrada no perímetro úmido foi para o módulo VIII (5,175 km<sup>2</sup>). Esta diferença acentuada pode ser explicada pelo fato de que, neste módulo, o rio Doce recebe a contribuição dos débitos de três grandes afluentes, entre os quais o Suaçuí-Grande. Além disso, o rio Doce atravessa uma região com pequeno controle estrutural, dando condições ao canal de desenvolver melhor seu perfil transversal.

Outro módulo que apresentou uma diferença grande no perímetro úmido foi o módulo VII, que apresenta os reflexos da situação anterior por se encontrar imediatamente a jusante do módulo VIII.

### 3) Análise da variação de níveis de cinza da lâmina de água

Segundo estudos realizados por Herz (1977), Ritchie et alii (1974), Meireles (1980) e Sausen (1981), a resposta espectral da água nos canais 4 e 5 das imagens do LANDSAT podem ser correlacionadas às variações na dispersão de sedimentos em suspensão. Assim sendo, procurou-se avaliar as diferenças de nível de cinza de um período para outro, de modo a inferir as possíveis alterações na dispersão de sedimentos da vazante para a enchente.

Analiando-se as amostras de níveis de cinza, coletadas em cada módulo, observa-se que os níveis de cinza, no canal 5, em geral duplicam no período pré para o pós-enchente. Estes dados são coerentes com os resultados obtidos por Sausen (1981), segundo o qual o canal do MSS 5 apresenta um melhor ajuste entre os valores de profundidade Secchi e níveis de cinza. O autor concluiu que este canal apresenta maior sensibilidade às variações de níveis de cinza provocadas pelas variações na concentração de sedimentos superficiais.

O aumento dos valores de nível de cinza do período pré para o pós-enchente pode ser explicado pelo aumento da descarga líquida do rio, que determina também um aumento de descarga sólida, conforme já tinha sido salientado por Leopold e Maddock (Christololetti, 1974). Segundo os autores, o fornecimento e transporte de sedimentos dependem da intensidade, duração e distribuição das chuvas sobre a bacia de drenagem. O aumento desses fatores determina um aumento no débito do rio. Confrontando-se dados de carga detrítica em suspensão, transportados em um dia, como débito médio diário, os autores concluíram que o crescimento da carga de sedimentos em suspensão é muito mais rápido que o aumento do débito.

Para verificar como a concentração de sedimentos em suspensão varia ao longo do canal

fluvial, foi construída uma tabela com os valores médios de níveis de cinza das amostras coletadas em cada módulo (Tabela 3).

Para análise da Tabela 3, pode-se observar que os níveis de cinza no canal 5 tendem a diminuir de jusante para montante nos dois períodos. Por exemplo, no módulo I ocorrem níveis médios de cinza em torno de 30 para o período seco e de 80 para o período chuvoso, os quais decrescem respectivamente para 27 e 70 no módulo III, e para 23 e 78 no módulo V. Ocorrem, entre tanto, excessões devido às características particulares da posição das amostras nos diferentes módulos. Por exemplo, devido à chegada de afluentes no rio Doce, que contribuem com o débito sólido, há um ligeiro aumento nessas médias em alguns módulos.

Para melhor visualizar a influência do posicionamento da amostra na resposta espectral da água, foi construído um gráfico em cuja ordenada e abcissa estão plotados, respectivamente, os níveis de cinza e a posição da amostra em relação à sua distância da foz do rio (Figura 4).

Pela análise da Figura 4 observa-se que, em média, há uma diminuição dos valores de níveis de cinza de jusante para montante no período de pós-enchente, e que isto é mais perceptível quando são analisados os valores de níveis de cinza do canal 4. Esta diminuição não é tão sensivelmente percebida no período seco. A análise da figura evidencia, ainda, que os níveis de cinza no período de pós-enchente são mais elevados que no de pré-enchente.

A análise da Figura 4, referente ao período de pós-enchente, evidencia uma ruptura na linha de variação de níveis de cinza, no canal 4, quando se passa do módulo IV para o módulo V. Os valores de nível de cinza que estavam em torno de 50, do módulo I ao IV, passam a oscilar em torno de 40, do módulo V ao IX. Isto pode ser explicado pela variação na data da obtenção da imagem LANDSAT. Do módulo I ao IV a imagem é referente ao mês de março, enquanto do módulo V ao IX ela é referente ao mês de abril. Assim sendo, as variações das condições atmosféricas, do ângulo de elevação solar e do azimute podem ser responsáveis pela variação da quantidade de energia disponível na superfície para o imageamento. Observa-se que essa diferença na resposta das imagens tomadas em épocas diferentes é mais visível no canal 4, pois esta faixa espectral é mais sensível às variações nas condições atmosféricas e de iluminação da cena. Com isso, as conclusões a serem tiradas dos dados devem ser sempre relativas a uma mesma cena, não se podendo comparar as duas datas com segurança, uma vez que não existem dados de campo para a calibração dos dados.

TABELA 3

VALORES MÉDIOS DOS NÍVEIS DE CINZA

MÓDULO	NÚMERO DA AMOSTRA	DISTÂNCIA DA DESEMBOCADURA (km)	CANAL 4		CANAL 5	
			PRÉ-ENCHENTE (MÉDIA)	PÓS-ENCHENTE (MÉDIA)	PRÉ-ENCHENTE (MÉDIA)	PÓS-ENCHENTE (MÉDIA)
I	1	2,0	38,62	52,18	30,43	83,37
	2	10,0				
	3	17,0				
	4	22,0				
II	1	28,5	33,50	44,33	24,75	76,33
	2	50,5				
	3	53,5				
	4	57,5				
	5	58,0				
	6	Lagoa				
III	1	63,0	36,32	48,75	27,00	76,75
	2	67,0				
	3	75,0				
	4	80,0				
	5	85,0				
	6	88,5				
	7	89,0				
IV	1	93,0	23,50	50,18	27,31	76,37
	2	105,0				
	3	109,5				
	4	116,0				
V	1	123,0	21,58	38,00	22,91	77,83
	2	125,5				
	3	150,0				
VI	1	152,5	23,28	36,68	27,87	74,03
	2	157,5				
	3	159,5				
	4	177,0				
	5	178,5				
	6	180,0				
	7	182,5				
	8	187,5				
VII	1	198,0	21,25	35,80	24,05	71,85
	2	201,0				
	3	216,0				
	4	218,0				
	5	226,5				
VIII	1	231,0	22,34	34,84	27,46	76,56
	2	233,5				
	3	234,5				
	4	240,0				
	5	242,5				
	6	251,0				
	7	252,0				
	8	257,0				
IX	1	263,5	23,29	35,20	28,33	75,58
	2	264,5				
	3	271,0				
	4	279,5				
	5	283,0				
	6	293,0				

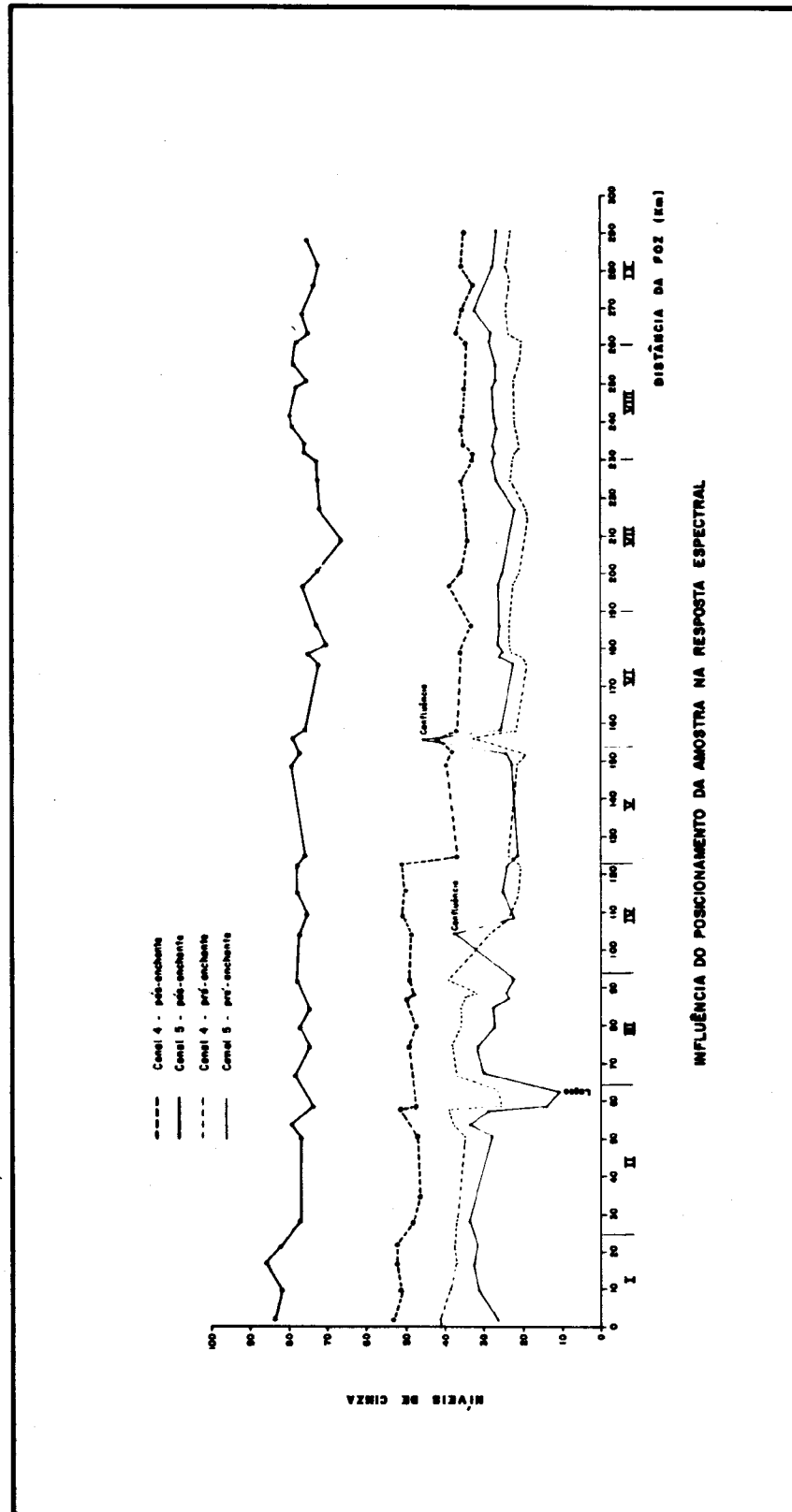


Fig. 4 - Influência do posicionamento da amostra na resposta espectral.

A análise da variação dos níveis de cinza no período seco mostra variações abruptas em torno do valor médio. Estas variações puderam ser associadas à presença de lagos e às confluências de afluentes mais importantes do rio Doce. No módulo II, por exemplo, os níveis de cinza do canal 4 oscilam entre 30 e 40, respectivamente, caindo bruscamente para o nível 10 no canal 5 e 25 no canal 4. Essa queda no valor do nível de cinza foi associada a uma amostra coletada numa das lagoas marginais do rio Doce, que no período seco apresentam água bastante limpa, funcionando como bacia de decantação de sedimentos e apresentando, portanto, níveis de cinza baixos.

No módulo IV existe um aumento brusco de nível de cinza no canal 5, que pode ser associado à confluência de um afluente da margem esquerda do rio Doce. A variação de níveis de cinza no canal 4, entretanto, não acusou esta confluência.

No módulo VI também observa-se um aumento do nível de cinza nos 2 canais, de 20 para quase 40, o qual está associado à confluência do rio José Pedra com o rio Doce.

Comparando-se as curvas do período de pré-enchente com as do período de pós-enchente, observa-se que no de pós-enchente as confluências e os lagos não são detetados pela variação de níveis de cinza. Isto pode ser explicado pelo fato de que a carga sólida do rio é aumentada não apenas pela contribuição do escoamento fluvial, através de seus afluentes, mas também pela contribuição direta do escoamento pluvial.

#### 4. CONCLUSÕES

Considerando-se as limitações de tempo e a disponibilidade de material, de informações de campo e de custo, pode-se concluir que a utilização de dados sequenciais do LANDSAT permite uma avaliação preliminar de áreas afetadas por inundações, bem como o levantamento dos principais condicionadores naturais que a explicam.

Nesta perspectiva, este trabalho pretende ser uma contribuição à metodologia de aplicação de técnicas de sensoriamento remoto no monitoramento de enchentes. Para que melhores resultados possam ser alcançados, sugere-se o prosseguimento das pesquisas intensificando-se trabalhos de campo simultâneos à obtenção de imagens e aumentando-se o número de período de análise da lâmina de água

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOTELHO, C.C. Hidrografia. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Geografia do Brasil*; Região Sudeste. Rio de Janeiro, 1977. v. 3, p. 119-142.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. São Paulo, Edgar Blücher, 1974.

DEFFONTAINES, P. Ensaio de divisões regionais e estudo de uma civilização pioneira. O Estado do Espírito Santo. *Boletim Geográfico*, 19(2):985-999, 1944.

DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). *Projeto Jequitinhonha*. Rio de Janeiro, 1978. v. 1.

GENERAL ELECTRIC (GE). *Image-100 - interactive multispectral analysis system; user manual*. Daytona, 1975.

HERZ, R. *Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos: contribuição metodológica do estudo de processos lagunares e costeiros do Rio Grande do Sul através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto*. Tese de Doutorado em Geografia. São Paulo, USP, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, 1977.

LAMEGO, A.R. Análise tectônica morfológica do sistema da Mantiqueira, Brasil. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE MINAS E GEOLOGIA, 2., Petrópolis, 1946. *Anais*. Petrópolis, SBG, 1946, v. 3, p. 52-64.

MEIRELLES, D.S. *Aplicação das técnicas de sensores remotos na hidrografia com ênfase à batimetria*. Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, INPE, 1980. (INPE-1673-TDL/013).

NIMER, E. Clima. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Geografia do Brasil*, Região Sudeste. Rio de Janeiro, 1977. v.3, p. 51-89.

RICHTIE, J.C.; MCHENRY, J.R.; SCHIEBE, F.R.; WILSON, R. The relationship of reflected solar radiation and concentration of sediment in surface water of reservoirs. In: SHAROKHI, F. ed. *Remote Sensing of Earth Resources*. Tullahoma, TN, The University of Tennessee, 1974. v.3, p. 57-71.

ROBINOVE, C.J. Interpretation of a LANDSAT image of an unusual flood phenomenon in Austrália. *Remote Sensing of Environment*, 7:219-225, 1978.

SANTOS, A.P.; NOVO, E.M.L.M.; DUARTE, V. *Exemplo de aplicação de dados do sistema LANDSAT, no estudo das relações entre com partimentação topográfica e qualidade das pastagens no município de Paragominas (PA)*. São José dos Campos, INPE, jun. 1980. (INPE-1756-RPE/145).

SAUSEN, T.M. *Estudo dinâmico do alto rio São Francisco e reservatório de Três Marias*. Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações. São José dos Campos, INPE, 1981. (INPE-2249-TDL/066).

SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B. Contribuição ao estudo do delta do rio Doce: aspectos geomorfológicos. *Notícia Geomorfológica*, 17(34):45-58, dez. 1977.

VELASCO, F.R.D.; PRADO, L.O.C.; SOUZA, R.C.M. *Sistema MAXVER; Manual do usuário*. São José dos Campos, INPE, jul. 1978. (INPE-1315-NTI/110).

WISLER, C.O.; BRATER, E.I. *Hidrologia*. Tradução de Leonino Jr. 2. ed. Rio de Janeiro, Livro Técnico, 1964.