

PROCESSOS DE DISPERSÃO DO MATERIAL EM SUSPENSÃO TRANSPORTADO
POR ÁGUAS COSTEIRAS DA BARRA NORTE - RIO AMAZONAS

R. HERZ*, A. MAGLIOCCA, C. TEIXEIRA

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICO

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SP - BRASIL

RESUMO

Plataformas orbitais SMS, METEOSAT e LANDSAT tem proporcionado grande expansão do conhecimento dos processos costeiros relacionados ao transporte do material sólido mantido em suspensão por águas da plataforma continental brasileira. A partir da observação sistemática de imagens repetitivas dos referidos satélites, reuniu-se apreciável quantidade de informações que complementam determinadas hipóteses anteriormente estabelecidas em pesquisas resultantes de amostragem terrestre efetuadas em superfície. Com essa técnica de observação dos fenômenos naturais a distância, é possível estabelecer com apreciável grau de precisão e sinopticidade, a distribuição espacial de diferentes concentrações de material em suspensão, atribuindo às águas costeiras certas tendências dinâmicas deduzidas da correlação desses dados com os de apoio terrestre. Muitas dessas evidências decorrentes de pesquisas oceanográficas encontram um detalhamento bastante complexo quando são analisadas as imagens MSS dos satélites LANDSAT. Tanto a localização das áreas fonte, como também a mecânica dos processos de mistura das águas fluviais da bacia amazônica com as oceânicas, podem ser identificadas na costa oeste do Atlântico Equatorial.

E também:

* Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo - IOUSP
São Paulo - SP - Brasil

1. INTRODUÇÃO

A região costeira da Barra Norte, afetada predominantemente por águas do rio Amazonas, fica exposta a processos sedimentares de transporte e acumulação extremamente dinâmicos. Este fenômeno de interação continente/oceano reflete-se sobre as águas costeiras até a sua zona de convergência com águas da corrente das Guianas, dispersando material em suspensão desde a latitude 05°S até o mar do Caribe em latitudes superiores a 25°N .

Os trabalhos de pesquisa realizados por métodos de levantamento direto na bacia amazônica estabeleceram as primeiras evidências de tais processos. A eles, somam-se, atualmente, as informações orbitais acumuladas nos últimos cinco anos, trazendo uma nova contribuição à qualificação geográfica do referido fenômeno.

Da interpretação sistemática detalhada de imagens multi-espectrais produzidas por satélites LANDSAT, a partir de órbitas polares de altitude média de 920 Km, bem como informações complementares oriundas de plataformas SMS e METEOSAT, geoestacionárias no plano equatorial a 75°W e 0°W a uma altitude orbital de 36.000 Km, conclue-se que as tendências de dispersão desse material em suspensão são bastante coerentes com os resultados da distribuição de parâmetro físico-químicos e biológicos apresentados em TEIXEIRA [1], TEIXEIRA e TUNDISI [2], MAGLIOCCA [3] e DIEGUES [4], DHN [5] [6] e MILLIMAN et al [7].

De um modo geral as propriedades físicas encontradas pelos citados autores, em diferentes oportunidades, tem sua distribuição em superfície bastante similares ao mapeamento das diferentes concentrações de sólidos em suspensão, deduzidos das imagens multiespectrais MSS em função do seu comportamento ótico.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SISTEMA HIDROGRÁFICO AMAZÔNICO E ÁGUAS COSTEIRAS EQUATORIAIS DO ATLÂNTICO OCIDENTAL

O sistema fluvial que abrange a bacia hidrográfica do rio Amazonas compõe uma superfície continental de aproximadamente 7×10^6 km², correspondendo à mais extensa rede de drenagem integrada do planeta. Com um débito extremamente variável de extremos de $0,9 \times 10^5$ m³/s para períodos de estiagem e $2,25 \times 10^5$ m³/s para situações de enchente, as águas deste sistema transportam apreciável carga de detritos orgânicos e minerais até a plataforma continental adjacente. Todo esse material é função dos processos de alteração sazonal, constantemente ativados no Domínio Morfoclimático Amazônico e derivados das múltiplas combinações entre seus elementos naturais [9].

Considerando as diferentes sub-bacias dessa estrutura hidrográfica e as principais áreas fontes, das quais provém o conteúdo sólido em suspensão nas águas, SIOLI [10] propõe que as mesmas podem ser classificadas em rios de águas claras, brancas ou pretas; sendo que seu estudo fundamentou-se no reconhecimento de padrões da suspensão escoada em três grandes regiões do domínio amazônico: Andina, Escudo Central-Brasileiro-Guianenses e Amazônia Central [11]. Nestas províncias, o produto lançado às águas fica caracterizado não só pelas propriedades geoquímicas dos solos, como também em decorrência do metabolismo próprio, intrínseco de cada uma de suas paisagens.

Águas brancas correspondem à suspensão em que predominam partículas minerais altamente concentradas de silte e argila, liberadas das vertentes das altas cabeceiras de afluentes situados na província Andina. Tais contingentes sedimentares, ao atingir as Terras Baixas [9], são estimados em 5×10^8 ton/anuais por GIBBS [12] ou 10^9 ton/ anuais por KATZER [13]. Estes sedimentos são continuamente lançados às águas costeiras por um volume médio de 2×10^5 m³/S de água doce, parte deste material é alterado por processos costeiros que atuam sobre as águas continentais, representando a quinta parte da vazão fluvial em escala mundial. Sobre a plataforma continental da costa norte a carga sólida que passa pela barra do rio Amazonas é em parte depositada, do

cumentando geologicamente um mecanismo cíclico das formas de interação continente oceano [14]. Ainda GIBBS [15] menciona que a distribuição do conteúdo sedimentar, ao longo da costa amazônica, é controlada por processos oceanográficos múltiplos e associados, tendo como efeito predominante a ação da corrente das Guianas, que se desloca rumo nordeste, no sentido do mar do Caribe.

Sensíveis variações sazonais provocam regimes de mistura diferencial bastante acentuados, quanto à distribuição das propriedades físico-químicas das águas costeiras e oceânicas.

LUEDEMANN [16] E LUEDEMANN e PEREIRA [17], através da interpretação de resultados levantados por lançamento de corpos de deriva de superfície durante as missões oceanográficas: Equatorial Atlantic (EQUALANT) e Global Atlantic Tropical Experiment (GATE) em 1974, comprovam a existência do sistema de circulação no rumo noroeste entre 05°S e 025°N da costa atlântica ocidental. Nessa situação, os sólidos em suspensão incorporados às águas costeiras, quando introduzidos na zona de convergência com a corrente das Guianas, atingem latitudes ainda superiores à do mar do Caribe, conforme estabeleceu BASSIN [18] com a identificação de sedimentos depositados nessa região do Atlântico equatorial.

MILLIMAN, et al [7] esclarecem que a frente de água predominantemente doce, quando em situação de enchente, estende-se até 180 Km ao largo da costa, proporcionando uma superfície de mistura que cobre praticamente toda a plataforma continental entre as latitudes da costa norte.

Muitos dos resultados de campanhas oceanográficas distintas, junto à foz, indicam que existe, sobre o mar, uma camada superficial de água do rio Amazonas com espessura variável de 10 a 20 cm. Entretanto, este fato não ocorre de forma contínua, havendo à superfície, o insulamento de volumes de água doce e salobra separados das águas costeiras provavelmente por ação de fortes correntes de maré, que atingem

250 cm/s [4]. Isto é, muitas vezes, interpretado como migração de água marinha sobre a margem continental, que flue por ressurgência entre águas menos salinas, [15], o que parece ser improvável, em razão das evidências encontradas em dados posteriores.

Tanto nos períodos de vazante, de enchente, ou de estiagem não há indícios de penetração de cunha salina no vale do rio, mas é incontestável a existência de estratificação vertical bem discriminada, podendo avançar de 60 a 185 Km nos períodos mais secos, e 80 a 230 Km nos meses mais chuvosos.

De um modo geral esses efeitos físico - químicos afetam a biologia das águas como foi observado por TEIXEIRA [1] e TEIXEIRA e TUNDISI [2], e nesse aspecto a região estudada apresenta dois tipos de populações fitoplanctônicas bem diferenciadas, não só em termos quantitativos como também qualitativos. Na camada superficial, com grande influência das águas do rio Amazonas, a composição específica é caracte-rizada por uma grande predominância de diatomáceas neríticas e uma biomassa bastante elevada, proporcionando uma produção primária máxima de 0,864 g C/m²/dia. Entretanto, à medida que diminui a influência das águas do rio, a composição do fitoplancton sofre uma marcada mudança, e sua biomassa um forte declínio. O fitoplancton passa a ser caracte-rizado por uma flora de Cocolitoforídeos e a produção primária, como conse-quência do declínio da biomassa, alcança valores mínimos da ordem de 0,014g C/m²/dia [2].

Pesquisas efetuadas sobre o fracionamento do fitoplancton demonstraram haver uma pronunciada diferença quantitativa entre o nanofitoplancton e o microfitoplancton. A diferença quantitativa, conside-rada em termos estáticos ("Standing-stock"), apresentou um valor máximo para o microfitoplancton nas águas oceânicas, com cerca de 28,50%, cain-do para 17,00% nas águas costeiras. Com relação ao nanofitoplancton, foram encontrados valores inversos, isto é, 83,00% nas águas costeiras e 71,50% nas oceânicas. Em termos dinâmicos (produção primária), enquan-to a produção relativa a 20 milhas da costa foi da ordem de 100, à distância de 120 milhas a produção caiu para 7,9 e, a 325 milhas apenas

5,3%. Estes resultados sugerem, fortemente, que dentro da área estudada, as condições nutricionais são bastante diferentes, o que leva a supor que os sedimentos em suspensão agem como fonte de suprimento de nutrientes para as algas do fitoplâncton. Pela análise dos trabalhos de TEIXEIRA [1] e TEIXEIRA e TUNDISI [2], pode-se ver claramente estes fatos tanto horizontal como verticalmente.

As águas do rio Amazonas são pobres em fosfato solúvel, mas os sedimentos suprem essa falta [19], pois eles absorvem cerca de 10 vezes a concentração de fosfatos da água em contato [20], num processo reversível favorecido pelo aumento do pH. Desse modo, o material em suspensão transportado pelo rio Amazonas libera fosfato quando atinge o estuário, sendo consumido nos 5 m superficiais onde a turbidez é reduzida, permitindo a penetração de luz [3].

Os trabalhos de levantamento da dispersão do material em suspensão, introduzidos na costa norte por águas do rio Amazonas, elaborados por GIBBS [15], [21] e MILLIMAN et al [7] somam, ao conhecimento físico da região, valores bastante atuais, representando resultados bastante consistentes quanto à sua distribuição.

Dos depósitos de fundo, atuais e sub-atuais, é possível deduzir que, além da plataforma, o processo de seleção natural, em função da granulometria, lança, além do talude, pelo vale submerso da plataforma, sedimentos que atingem profundidades de 4.000m [22] envolvendo o cone amazônico descrito fisiograficamente por DAMUTH [23].

3. TRANSPORTE COSTEIRO DE MATERIAL EM SUSPENSÃO OBSERVADO POR SATÉLITES LANDSAT

O transporte e a dispersão de partículas, em suspensão em águas fluviais, lagunares ou marinhas, têm sido observado com grande sucesso por sensores multiespectrais de plataformas LANDSAT. As diferentes propriedades óticas promovem grandes variações no registro espectral das diversas concentrações de material nas águas, modificando o fluxo de energia eletromagnética retroespalhada em direção ao sensor do

satélite. Por isto, afirma-se que as partículas em suspensão, transportadas pelas águas, atuam como traçadoras da tendência dinâmica, além de representarem a sua distribuição geográfica em razão da fonte de origem.

Para as referidas plataformas orbitais o sub sistema MSS tem sido de boa eficiência, produzindo sistematicamente as informações sobre tal processo ao largo de toda a costa brasileira. Normalmente, os intervalos espectrais correspondentes aos canais MSS-4 e MSS-5 é que tem apresentado maior quantidade de evidências, com respeito às propriedades óticas de águas com diferente turbidez. Apesar disso, o MSS-6 e MSS-7, em alguns casos, têm revelado a presença de material em suspensão concentrado na camada superficial das águas.

No caso da costa norte, esse fato foi verificado nas imagens da órbita 241 (ponto 12 e 13) de 07 de julho de 1975; aparecendo uma frente de suspensão (MSS-7) seguramente em processo de floculação, entre $01^{\circ}30'N$ e $00^{\circ}30'N$ de latitude e $49^{\circ}30'W$ e $49^{\circ}00'W$ de longitude, dispersando-se na direção sudeste-noroeste e apresentando formas filamentosas no sentido nordeste. Ao analisar toda a série multiespectral, verifica-se nitidamente que, do infravermelho próximo para a faixa de radiações predominantemente verdes, a concentração sedimentar aumenta, resultando no aumento gradual do nível de sinal pela energia retroespalhada e registrada nos quatro canais MSS. Os limites de penetração da citada frente avançam 110Km ao largo da ilha Caviana, deixando vestígios menos marcados além do Cabo Norte, numa extensão de 100 Km, para fora da linha do litoral.

HERZ [24] e HERZ e MALUF [25], a partir de resultados de interpretação de imagens MSS-4 e MSS-5 obtidas sobre a Amazônia pelo LANDSAT-1 (Figura 1), chamavam a atenção para o fato de que o material em suspensão lançado pelo rio às águas costeiras distribuía-se geograficamente de forma muito semelhante às superfícies definidas por parâmetros físico-químicos (Figura 2) levantados por MAGLIOCCA [3]. Além dessas faixa, paralelamente à costa e às curvas batimétricas a 180 Km do mesmo ponto da foz do rio Amazonas, nova linha pode ser traçada

muito nitidamente para separar, das águas marinhas, um corpo d'água sa lobra de aproximadamente 20 Km de largura e 200 de comprimento. A parentemente, o conteúdo sólido, menos concentrado, passa por um lento processo de mistura, ficando isolado das águas costeiras, já em fase de incorporação à corrente das Guianas, que segundo LUEDEMANN [17] desloca-se para noroeste com uma velocidade média de 110 cm/s. no verão.

Há referência sobre esse fato nos trabalhos de DHN [5] e [6], MAGLIOCCA [3] e DIEGUES [4], e que GIBBS (1976) refere-se a um ressurgimento de água marinha por camadas sub-superficiais na plataforma. No entanto, ao se estudar detalhadamente alguns sobrevoos do LANDSAT-2, em épocas distintas, é possível estabelecer a seguinte hipótese (Figura 2, Figura 3 e Figura 4): o conhecido efeito de flutuação de nível do rio por barragem de maré até 850 Km, para montante, mencionado por MARLIER, [26] decorre dos grandes desníveis (12m) alcançados em cada ciclo, o que faz com que grandes volumes de água sejam acumulados sobre a plataforma continental adjacente. Deste movimento derivam correntes de declive por ação do empilhamento de água nos picos da maré, podendo atingir velocidades de até 250 cm/s [4], deslocando inclusive a distribuição dos parâmetros físico-químicos em relação ao litoral [21]. O material em suspensão, visível nas imagens, também acompanha o mesmo processo sendo que, no decurso de maré vazante, as águas fluviais avançam para, logo depois, serem comprimidas de volta à costa por correntes de maré enchente (Figura 3 e 4, indicação A e B). Entretanto, de um período de estofa para outro de vazante, deve ocorrer o insulamento de lâminas d'água doce sobre águas marinhas levadas à deriva até os limites do talude, onde são conduzidas para noroeste, por águas da corrente oceânica (Figuras 1, 3 e 4, indicação C). MILLIMAN et al [7] refere-se a este fato como sendo uma ressuspensão de material de fundo (0,06 a 0,15mg/l) numa faixa em que predominam concentrações terrígenas, o que parece ser improvável, por ser uma zona de batimetria muito pronunciada.

4. CONCLUSÃO

Segundo os autores relacionados, em especial GIBBS [21] e MILLIMAN et al [7], deve ser lembrado que o material em suspensão é inversamente proporcional à salinidade, variação esta perfeitamente adequada aos mapas de isotermas e isohalinas existentes, bem como a todas as sequências de imagens orbitais já interpretadas.

Os valores de suspensatos na foz do rio Amazonas, em episódios chuvosos, oscilam em torno de 140 mg/l [12] sendo registrados nas imagens MSS com sinal de alto ganho para tonalidades de cinza muito claras, correspondentes à alta reflectância, provocada por esse tipo de concentração.

Sua dispersão cada vez maior, quando em sentido oposto ao do litoral, onde as águas marinhas sempre carregam menos do que 0,10 mg/l, faz com que o conteúdo suspenso varie amplamente e, quando em mistura mais distante da costa, permaneça em água salobra de 0,25 mg/l a 21,0 mg/l.

Outro fato importante a considerar é que, nessa relação, a suspensão predominantemente mineral na zona costeira, alterada quimicamente por flocculação em contato com as águas marinhas [27], dá lugar ao aparecimento de valores de até 80% de matéria orgânica em águas salobras e oceânicas, o que é um característico comum dos mesmos [28], conforme lembram MILLIMAN et al [7].

O uso da informação orbital é, sem dúvida, um recurso extraordinário para o reconhecimento mais preciso dos processos de dispersão de material em suspensão em águas costeiras, apesar das limitações ainda existentes e inerentes ao próprio desenvolvimento tecnológico. A compatibilização das características de repetitividade de cada satélite com a estrutura dinâmica dos fenômenos oceanográficos, criará condições suficientes para que seja possível levar a efeito missões oceanográficas que possam revelar, em detalhe, o desenvolvimento temporal e espacial desses processos.

O produto combinado dessa nova tecnologia, com trabalhos oceanográficos convencionais, levará as pesquisas a resultados quantitativos de grande confiabilidade, principalmente no tocante à sua distribuição geográfica sobre extensas superfícies oceânicas em que se torna impossível realizar medidas com características sinópticas [29].

BIBLIOGRAFIA

- [1] TEIXEIRA, C. Relative rates of photosynthesis and standing stock of the net-phytoplankton and nanoplankton. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, (13):53 - 60, 1963.
- [2] _____; TUNDISI, J. Primary production and phytoplankton in equatorial waters. *Bulletin of Marine Science*, 17(4) : 884-891, 1967.
- [3] MAGLIOCCA, A. *Some chemical aspects of the marine environment of the amazon and Pará rivers, Brasil.* Bolm. Inst. Oceanogr., 20:61 - 84, 1971.
- [4] DIEGUES, F.M.F. Introdução à oceanografia do estuário amazônico. *Anais Hidrográficos*, 29:129 - 157, 1972.
- [5] DHN. *Atlas oceanográfico-centro norte do Brasil: condições de julho a agosto de 1973.* Rio de Janeiro, 1973. v.3
- [6] DHN. *Atlas oceanográfico- costa norte do Brasil: condições de outono de 1976.* Rio de Janeiro, 1978.
- [7] MILLIMAN, J.D.; SUMMEHAYES, C.P.; BARRETO, H.T. Contribuição ao estudo de material em suspensão na plataforma continental do Amazonas. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 28^o, Porto Alegre, Anais v.3, p.263 - 282.
- [8] OLTMAN, R.E. *Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon River.* Washington, D.C.; U. S.G.S., 1968. 16p (circular, 552).
- [10] SIOLI, H. A limnologia na região Amazonica brasileira. In: *Encontro nacional sobre Limnologia, Psicultura e Pesca Continental*, 1., Belo Horizonte, 1976. Anais p. 153 - 165.

- [11] FITTKAU, E.J. Okologische gliederung des amazonas gebretes auf geochemischer grundlage. *Separata de Münster Forsch Geol. Plaont.*, (20 - 1):35 - 50, 1975.
- [12] GIBBS, R.J. The factors that control the salinity and the composition and the concentration of the suspended solids. *Geol. Soc. America Bull*, 78:1203 - 1232, 1967.
- [13] KTZER, Fr. Grundzuge der geologie des unteren Amazonasgebietes; des staates Parã a Brasilien. Leipzig, Max Weg, 1903.
- [14] GIBBS, R.J. The bottom sediments of the Amazon shelf and Tropical Atlantic Ocean. *Marine Geology*, (14):1139 - 1145, 1973.
- [15] _____. Circulation in the Amazon River estuary and adjacent Atlantic Ocean. *J. Mar. Res.*, (28):113 - 123, 1970.
- [16] LUEDEMANN, E.F. Preliminary results of drift-bottle releases and recoveries on the western tropical Atlantic. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 16(1):13 - 22, 1967.
- [17] _____; PEREIRA, S.G. *Some results of drift-bottle release in western equatorial waters during GATE*. São Paulo, USP. Instituto Oceanográfico, 1974. 22 p. (Relatório interno, 4)
- [18] BASSIN, N.J. Sources and transport of suspended particulates in the caribbean sea. *Marine Geology*, 20(4):289 - 310, 1976.
- [19] GESSNER, F. Observações sobre o regime de fosfato no rio Amazonas. *Separata do Bolm. Mus. "Emilio Goeldi"*, (1):74 - 83, 1962.
- [20] ARMSTRONG, P.A.J. Phosphorus. In: Riley, J.P.; Skirrow, G., ed. *Chemical oceanography*. London, Academic, 1965. v.1, p. 323 - 364.

- [21] GIBBS, R.J. Distribution and transport of suspended particulate material of the Amazon river in the ocean. In: Cronin, L.E., ed. *Estuary Processes*, New York, N.Y., Academic, 1976. v. 2, p. 35 - 47.
- [22] KUMAR, N.; BRYAN, G.M.; CARVALHO, J.C. et al. Summary of REMAR-LDGO cooperative research on the Brazilian continental margin. Part I: Northeastern Brazilian margin. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 28º, Porto Alegre; 1974 Anais v. 3, p. 323 - 324.
- [23] DAMUTH, J.E. *Western Equatorial Atlantic: morphology quaternary sedimenty and climatic cycles*. Tese de Doutorado. New York, N.Y., Columbia University, 1973. inédito.
- [24] HERZ, R. Barra norte Rio Amazonas. In: Resultados preliminares obtidos com imagens do Satélite ERTS-1, para encaminhamento à COBAE. São José dos Campos, INPE, Abr. 1973. cap. 5, 30 - 41. (INPE-326-R135)
- [25] _____; MALUF, S. Projeto Barra do Rio Amazonas. In: Coleção dos Resultados relevantes obtidos com as imagens do Satélite ERTS-1 pelo Instituto de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, INPE, 1975. v. 1, cap. 2, p. 9 - 111. (INPE-780-NTE/039).
- [26] MARLIER, G. Limnology of the congo and Amazon Rivers. In: MAGGARS, B.J.; AYENSU, E.S.; DUCKIWORTH, W.D. *Tropical florest ecosystems in Africa and South America: a comparative rivew*. Washington, D.C., Smith Soncan Inst. Press., 1973. p. 223 - 238.
- [27] MEADE, R.H. Transport and deposition of sediments in estuaries. In: NELSON, B.W. ed. *Environmental framework of coastal plain estuaries*. Geol. Soc. of America, 1972.

- [28] MAHEIM, F.T.; MEADE, R.H.; BOND, G.C. Suspended matter in surface waters of the Atlantic continental margin from Cape Cod to the Florida Keys. *Science*, (167):371 - 376, 1973.
- [29] COUSTEAU, J.Y. A time to choose. In: *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 10., Ann Arbor, Mi, 1975. Proceedings. v.1, p. 505 - 509.

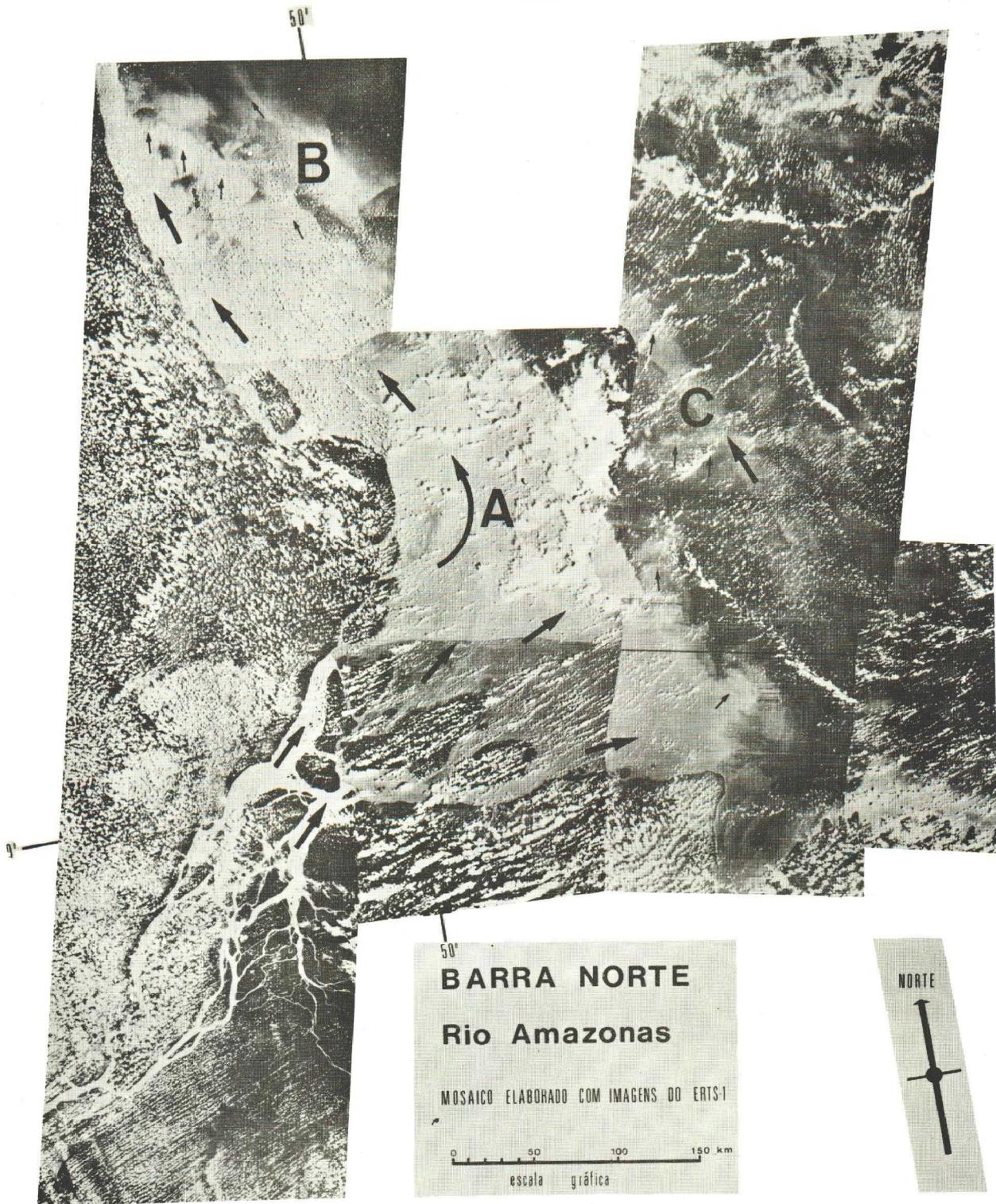


Figura 1 - Mosaico de imagens LANDSAT MSS-5 abrangendo a Barra Norte-Rio Amazonas segundo HERZ e MALUF (1975).

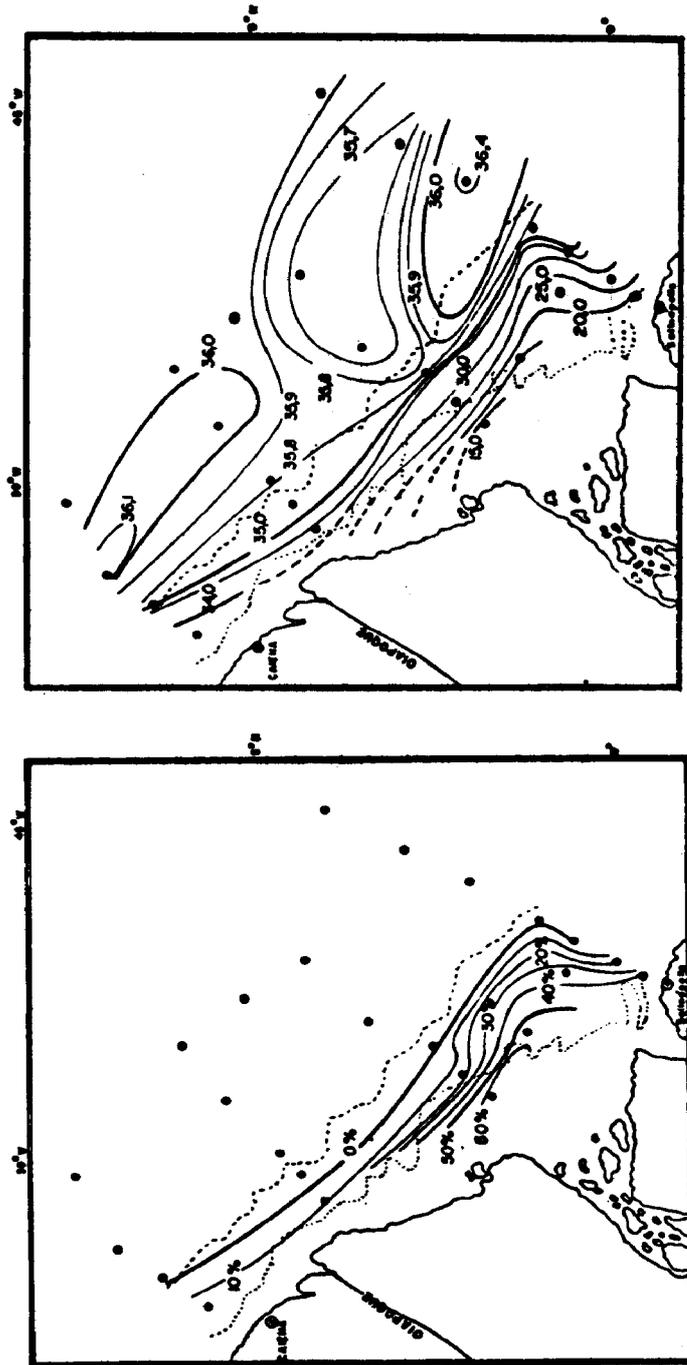


Figura 2 - Distribuição da predominância da água marinha ou fluvial e salinidade de superfície segundo MAGLIOCCA (1971).

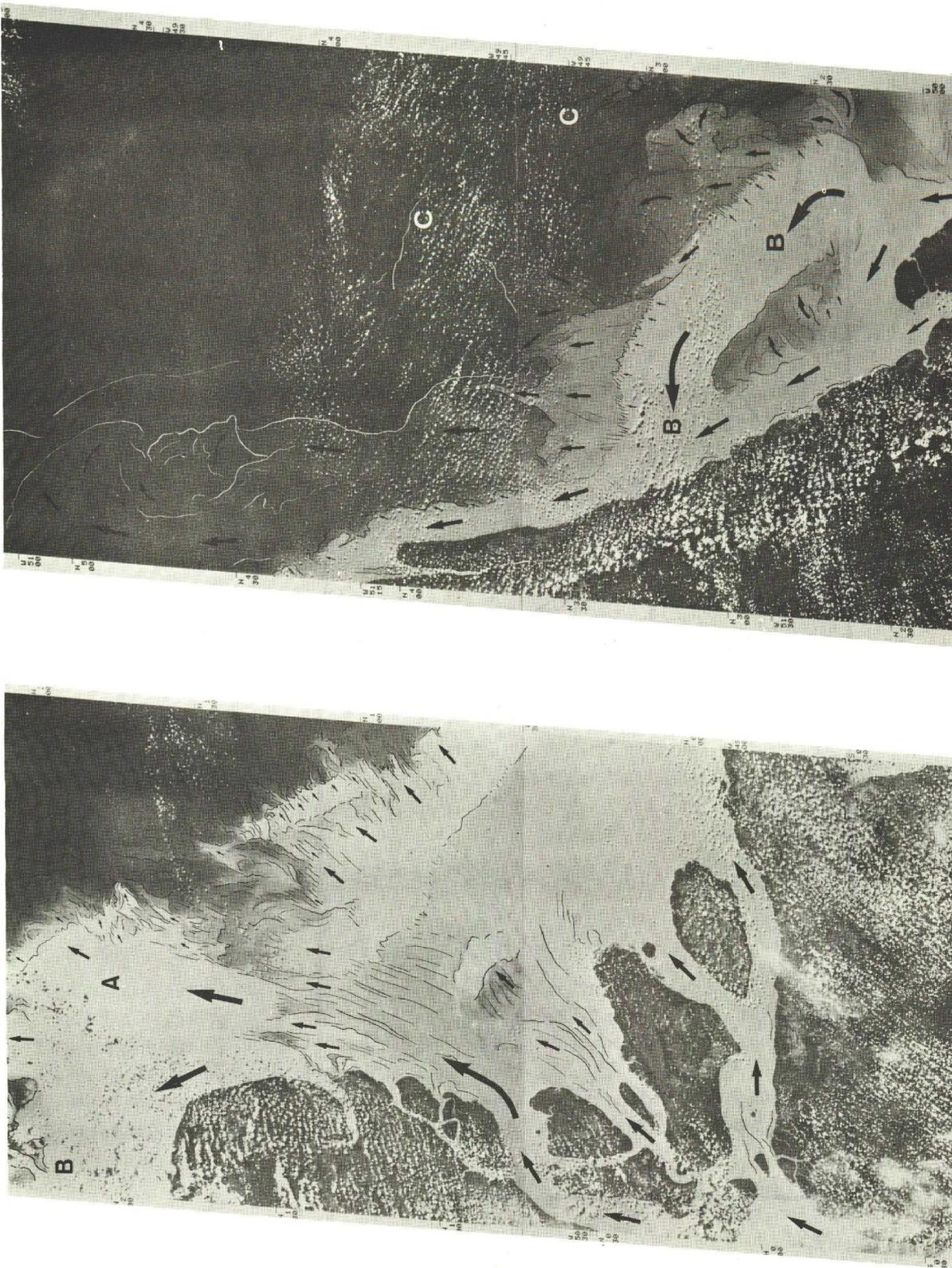


Figura 3 - Diferentes situações dos processos costeiros da Barra Norte, conforme interpretação de imagens LANDSAT de 7 JUL 75 e 26 AGO 76.



Figura 4 - Processos de dispersão de material em suspensão detectados pelo LANDSAT-2 a 17 e 18 de Dezembro de 1975 para as órbitas 241 e 242. pontos 11 a 13.