

PROCESSUS DE DISPERSION DES SEDIMENTS EN SUSPENSION TRANSPORTES PAR LES EAUX COTIERES DE BARRA NORTE FLEUVE AMAZONE, BRESIL

Renato HERZ ¹

Resumé

La télédétection spatiale (SMS, METEOSAT et LANDSAT) est fondamentale pour l'étude du transport des sédiments en suspension dans les eaux de la plate-forme continentale brésilienne ainsi que des processus de dispersion qui en sont liés. Les résultats de l'analyse systématique des images satellitaires (LANDSAT MSS et TM) ont été comparés aux données océanographiques pour tester des hypothèses. Grâce à la télédétection il a été possible d'établir une bonne corrélation entre les données de terrain et les données satellitaires ce qui a permis d'aboutir, avec un bon degré de précision, à la détermination de la distribution spatiale des concentrations et des phénomènes hydrodynamiques côtiers. Une partie de ces données avait déjà été obtenue par des recherches océanographiques mais jamais avec le détail et la précision fournies par les images MSS. C'est ainsi que l'identification des zones d'apport et d'interaction entre eaux continentales et eaux océaniques a pu être obtenue sur la côte occidentale de l'Atlantique Tropical.

Abstract

LANDSAT, SPOT and NOAA data have greatly improved the knowledge of the coastal processes related to the suspended solid material transport at the Brazilian continental shelf. These data check-up some previous hypothesis established by means of field research and sampling. It is possible now to establish, with a good degree of precision and synopticity, the spatial distribution of the sediment's concentration in the waters and to analyse the coastal hydrodynamics. The situation of the source' areas and the mechanics of the mixture between continental and oceanographic waters were identified on the west coast of the Tropical Atlantic by LANDSAT MSS and TM.

Mots-clés : Sédiments en suspension. Processus de dispersion. Amazone. Brésil

Key-words : Suspended material. Dispersion processes. Amazone. Brazil

¹ Instituto Océanográfico. Universidade de São Paulo. Brasil

INTRODUCTION

La région côtière de Barra Norte, dans l'embouchure de l'Amazone, est caractérisée par une dynamique sédimentaire très active (transport et d'accumulation) en liaison avec les phénomènes d'interaction eaux continentales - eaux océaniques dans la zone de convergence avec le courant des Guyanes. La dispersion des eaux et des sédiments fins amazoniens s'étend de 05° de latitude jusqu'à la mer des Caraïbes et parfois à des latitudes supérieures à 20° N. A partir de 15° lat. N les suspensions de surface deviennent très riches en particules floкулées par altération chimique avec les eaux de fond qui transitent vers le Caraïbes (LUEDEMANN, 1967)

Les travaux de terrain dans le bassin amazonien ont fourni des évidences de ces processus auxquels s'ajoutent, actuellement, les informations orbitales des derniers 5 ans. Les images satellitaires (LANDSAT, SMS et METEOSAT) révèlent que les tendances de dispersion des sédiments en suspension concordent avec les paramètres physiques-chimiques et biologiques des eaux (TEIXEIRA, 1963; TEIXEIRA & TUNDISI, 1967; MAGLIOCCA, 1971; DIEGUES, 1972; DHN, 1978; MILLIMAN et al., 1976): les cartes établies auparavant à partir des données de terrain montrent une distribution superficielle des sédiments en suspension similaire aux cartes établies par l'imagerie satellitaire .

I - CARACTERISTIQUES GENERALES DU SYSTEME HYDROGRAPHIQUE AMAZONIEN ET DES EAUX COTIERES EQUATORIALES DANS L'ATLANTIQUE OCCIDENTAL

L'Amazone est le premier fleuve du monde par l'étendue de son bassin (environ 7 millions de km²) et par son débit (estimé à 2×10^5 m³/s, soit environ 20% du total des apports fluviaux dans l'Océan mondial.). Tenant compte de l'ensemble du réseau et des zones-sources d'apport sédimentaire, SIOLI (1976) propose - en accord avec FITTKAU, 1975) - une classification des fleuves en trois types (eaux claires, blanches et noires) en rapport avec le domaine andin, le Bouclier Central Brésilien et des Guyanes, et l'Amazonie centrale.

Avec un débit très puissant mais variable ($0,9 \times 10^5$ en période d'étiage et $2,25 \times 10^5$ en saison des pluies) l'Amazone transporte une immense charge sédimentaire fine. La charge de fond est relativement limitée (1×10^8 tonnes/an) formée par des sables et des graviers et n'arrive à la plate-forme que pendant les périodes de pointe; elle s'accumule directement en face de l'embouchure au-delà de 50 m de fond (NITTROUER & DeMASTER, 1987). La charge en suspension

est largement dominante et s'accumule principalement dans la zone de l'estuaire et sur la plate-forme (EISMA et al., 1990. Symposium PICG 274-ORSTOM). Seulement $1,5 \times 10^8$ tonnes/an de sédiments en suspension sont transportés vers le NW le long des côtes guyanaises sous l'impulsion du courant des Guyanes.

Les résultats obtenus grâce aux bouées dérivantes de surface au cours des missions Equatorial Atlantic (EQUALANT) et Global Atlantic Tropical Experiment (GATE) en 1974 (LUEDEMANN, 1967 et LUEDEMANN & PEREIRA, 1974) confirment l'existence d'un système de circulation de direction NW entre 05°S et 025°N dans la côte atlantique occidentale. Dès que les sédiments en suspension atteignent la zone de convergence avec le courant des Guyanes, ils peuvent être transportés à des latitudes supérieures à celles de la mer des Caraïbes (BASSIN, 1976).

En ce qui concerne les différentes masses d'eau dans la zone de l'embouchure, le front d'eau douce déchargé à la mer pendant la période de crue - qui s'étend jusqu'à 180 km au large de la côte - est à l'origine d'un mélange d'eaux fluviales et océaniques qui occupe pratiquement toute la zone de la plate-forme continentale. En face à l'embouchure, une couche irrégulière et superficielle d'eau fluviale, de 10 et 20 cm d'épaisseur, existe en milieu marin. La séparation entre les eaux douces et saumâtres d'une part, et les eaux salées d'autre part, peut être expliquée par l'action des forts courants de marée (vitesses jusqu'à 250 cm/s). Une autre hypothèse avancée - que nous estimons improbable - s'appuie sur la migration de l'eau marine sur la marge continentale par résurgence dans des eaux moins salées.

Certes, il n'y a pas, à aucun moment de l'année, des preuves d'une remontée du coin salé dans l'estuaire; par contre, l'existence d'une stratification verticale est incontestable, celle-ci pouvant se déplacer entre 60 à 185 km vers l'amont en période sèches et entre 80 à 230 km en période humide.

II - INFLUENCE SUR L'HYDROBIOLOGIE COTIERE

Deux grands types de populations phytoplantoniques ont été identifiées dans notre zone de travail. (TEIXEIRA, 1963 et TEIXEIRA & TUNDISE, 1967). Dans la couche superficielle, où domine l'eau amazonienne il y a une grande population de diatomées néritiques et une biomasse élevée (avec une production primaire maxima de $0,864 \text{ g/C/m}^2/\text{jour}$). Par contre, dès que l'influence des eaux fluviales diminue, le phytoplancton est caractérisé par une flore de Cocolitophorideus, la biomasse diminue ainsi que la production primaire (valeurs minimum de l'ordre de $0,014 \text{ g/C/m}^2/\text{jour}$. (TEIXEIRA & TUNDISE, 1967).

On observe une différence quantitative (standing - stock) entre le nanrophytoplancton et le microphytoplancton en fonction de la qualité et de la nature des eaux : alors que le microphytoplancton présente un développement maximal dans les eaux océaniques (environ 28,50 %) - se réduisant dans les eaux côtières (17%) - les valeurs sont inversées pour le nanrophytoplancton, c'est à dire 83% dans les eaux côtières et 71,50 % dans les eaux océaniques. Quant à la production primaire relative, elle change par rapport à l'éloignement de la côte: à 20 milles de la côte elle est de l'ordre de 100%; à 120 milles, on enregistre seulement 7,9%, et à 325 milles 5,3 %. Les conditions de nutrition sont donc différentes, ce qui confirme que les sédiments en suspension apportent des nutriments pour les algues du phytoplancton.

III - TRANSPORT CÔTIER DE SEDIMENTS EN SUSPENSION OBSERVÉ PAR L'IMAGERIE LANDSAT

L'imagerie satellitaire est fondamentale pour l'étude du transport et de la dispersion de particules en suspension dans les eaux fluviales, lagunaires ou marines. LANDSAT - avec différentes propriétés optiques d'enregistrement par rapport aux diverses concentrations de matériel dans les eaux - permet de suivre la distribution géographique des particules en suspension depuis les zones-source.

MSS fournit systématiquement des informations sur des processus et sur la turbidité au large, grâce aux canaux 4 et 5. Quant aux canaux 6 et 7, ils permettent l'obtention des données sur la turbidité superficielle des eaux.

C'est ainsi que les images de l'orbite 241 (points 12 et 13) du 07 juillet 1975, ont mis en relief un front de suspension (canal 7) très vraisemblablement lié à des processus de floculation des argiles entre 01°30' et 00°30' de lat. N et 40°30' et 40° 00' de long. W GR.; ce front se disperse vers SE-NW et devient filandreux vers le NE (MAGLIOCCA, 1971). L'analyse de la série multispectral montre que la concentration sédimentaire augmente du proche infra-rouge vers la bande des radiations de vert dominant, en raison de l'augmentation graduelle du signal par l'énergie retrodiffusée enregistrée par les 4 canaux. Le front s'avance jusqu'à 110 km au large de l'île Caviana; au-delà, vers le cap Nord, il devient moins net.

Les canaux 4 et 5 de LANDSAT MSS-1 (fig. 1. HERZ, 1973; HERZ & MALUF, 1975) montrent que la distribution géographique du matériel en suspension déchargé par l'Amazone coïncide avec les surfaces définies par les paramètres physico-chimiques (MAGLIOCCA, 1971). Au-delà de ces zones, parallèlement à la côte et aux courbes bathymétriques - à environ 180 km au droit de

l'embouchure - un corps d'eau saumâtre d'environ 20 km de largeur et 200 km de longueur apparaît au milieu d'eaux marines. Moins concentrés, les sédiments en suspension subissent un lent processus de mélange, donnant naissance à des grandes tâches des les eaux côtières dans la zone d'incorporation avec le courant des Guyanes qui se déplace vers le NW avec une vitesse moyenne de 110 cm/s en été (LUEDEMAN, 1967).

D'autres auteurs (DNH, 1973; MAGLIOCCA, 1971; DIEGUES, 1972; GIBBS, 1973) font référence à une résurgence d'eau marine au milieu des couches sub-superficielles dans la zone de la plate-forme. Mais les scènes LANDSAT-2, prises à des époques différentes, montrent plutôt que l'effet de barrage des eaux fluviales par les marées sont très fortes (MILLIMAN et al., 1976) allant jusqu'à 850 km vers l'amont (12 m à chaque cycle), provoquant l'accumulation des grandes volumes d'eau sur la plate-forme continentale adjacente. De ce mouvement, dérivent des courants de dénivellation, formées par stockage de l'eau en marée haute. Ils peuvent atteindre jusqu'à 250 m/s, provoquant d'importantes perturbations physico-chimiques des eaux. Pendant la marée basse suivante, les eaux fluviales s'avancent vers le large pour être, par la suite, repoussées et "comprimées" vers la côte et vers l'embouchure par la marée montante. Ce mouvement d'énergie différentielle entre les eaux continentales et marines, expliquerait les lames d'eau douce en dérive dans les eaux océaniques jusqu'à la limite du talus. Un remaniement de sédiments de fond a été indiqué par MILLIMAN et al. (1976), nourrissant en sédiments fins ces zones au large, mais nous excluons cette hypothèse vu l'importance des profondeurs dans cette zone.

CONCLUSION

Le matériel en suspension est inversement proportionnel à la salinité, ces variations étant parfaitement concordantes avec les cartes des isothermes et de isohalines existantes, aussi bien que avec toutes les séquences des images orbitales obtenues.

Les valeurs de sédiments en suspension à l'embouchure de l'Amazone sont complexes: en saison des pluies elles oscillent autour de 140 mg/l en saison de pluies (les tonalités de gris très clair de MSS permettent de suivre les variations grâce à la haute réflectance des concentrations). Leur dispersion augmente vers le large : alors que dans les eaux saumâtre les concentrations sont de l'ordre de 0,25 à 21 mg/l., dans les eaux salées elles chutent à moins de 0,10 mg/l.

Les valeurs de la matière organique - suspension minérale prédominante dans la zone côtière, altérée chimiquement par floculation en contact avec les eaux marines - sont relativement élevés, avec un maximum de 80% (MILLIMAN et al., 1976).

Nous estimons que, dans les zones de contact des eaux continentales et des eaux océaniques - comme c'est le cas dans l'embouchure de l'Amazone - les données satellitaires complètent les résultats obtenus par les missions océanographiques et aident aux stratégies d'échantillonnage adaptées aux conditions du milieu et aux missions à venir. Cette méthodologie est sans aucun doute, une ressource fondamentale et indispensable pour la connaissance plus précise des processus de dispersion du matériel en suspension dans les eaux côtières, malgré les limitations existantes et inhérentes au propre développement technologique.

BIBLIOGRAPHIE

- ARMSTRONG (P.A.J.)**, 1965. - Phosphorus. In: Riley (J.P.), Skirrow (G), ed. Chemical oceanography. London, Academic, vol. 1, 323- 364 p.
- BASSIN (N.J.)**, 1976. - Sources and transport of suspended particulates in the Caribbean sea. Marine Geology, 20(4): 289-310.
- COUSTEAU (J.Y.)**, 1975. - A time to choose. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 10., Ann Arbor, MI. Proceedings. vol. 1, 505-509 p.
- DAMUTH (J.E.)**, 1973. - Western Equatorial Atlantic: morphology, Quaternary sedimenty and climatic cycles. Doctorial Theses. New York, N.Y., Columbia University.
- DHN**, 1973. - Atlas oceanográfico-centro norte do Brasil: condições de julho a agosto de 1973. Rio de Janeiro, vol. 3. DHN, 1978. - Atlas oceanográfico-costa norte do Brasil: condições de outono. 1976. Rio de Janeiro.
- DIEGUES (F.M.F.)**, 1972. - Introdução à oceanografia do estuário amazônico. Anais Hidrográfico, 29:129-157.
- FITTKAU (E.J.)** 1975. - Okologische gliederung des amazonas gebretes auf geochemischer grundlage. Off-print. Munster Forsch Geol. Plaont., (20 - 1):35-50.

- GESSNER (F.)**, 1962 - Observações sobre o regime de fosfato no rio Amazonas. Separata Bol. Museu "Emilio Goeldi", (1):74-83. Pará. Brasil
- GIBBS (R.J.)**, 1976 - The factors that control the salinity and the composition and the concentration of the suspended solids. Geol. Soc. America Bull, 78:1203-1232.
- GIBBS (R.J.)**, 1970 - Circulation in the Amazon River estuary and adjacent Atlantic Ocean. J. Mar. Res., (28):113-123.
- GIBBS (R.J.)**, 1973 - The bottom sediments of the Amazon shelf and Tropical Atlantic Ocean. Marine Geology, (14):1139-1145.
- GIBBS (R.J.)** 1976. - 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, vol. 2, 35-47 p.
- HERZ (R.)** 1973. - Barra Norte, Rio Amazonas. In: Resultados preliminares obtidos com imagens do Satélite ERTS-1, para encaminhamento à COBAE. São José dos Campos, INPE, Abr., cap. 5, 30- 41 (INPE-326-R135).
- HERZ (R.)**, **MALUF (S.)**, 1975. - 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, vol. 1, cap. 2, p. 9-111. (INPE-780-NTE/039).
- KATZER (Fr.)**, 1903. - Grundzuge der geologie des unteren Amazonas gebietes; des states Pará a Brasilien. Leipzig, Max Weg.
- KUMAR (N.)**, **BRYAN (G.M)**, **CARVALHO (J.C.)**, et al, 1974. - Summary of REMAR-LDGO cooperative research on the Brazilian continental margin. Part I: Northeastern Brazilian margin. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28o, Pôrto Alegre. Anais vol. 3, 323-324 p.
- LUEDEMANN (E.F.)**, 1967. - Preliminary results of drift-bottle releases and recoveries on the western tropical Atlantic. Bolm. Ins. Oceanogr., 16(1):13-22.
- LUEDEMANN (E.F.)**, **PEREIRA (S.G.)**, 1974. - Some results of drift-bottle release in western equatorial waters during GATE. São Paulo, USP. Instituto Oceanográfico, 22 p. (Relatório interno, 4).
- MAGLIOCCA (A.)**, 1971. - Some chemical aspects of the marine environment of the Amazon and Pará rivers, Brasil. Bolm. Inst. Oceanogr., 20: 61-84.

- MAHEIM (F.T.), MEADE (R.H.), BOND (G.C.), 1973.** Suspended matter in surface waters of the Atlantic continental margin from Cape Cod to the Florida Keys. *Science*, (167):371-376.
- MARLIER (G.), 1973.** - Limnology of the Congo and Amazon Rivers. In: **MAGGARS (B.J.) AYENSU(E.S.) DUCKIWORTH (W.D.)** - Tropical forest ecosystems in Africa and South America: a comparative review. Washington, D.C., Smith Soncan Inst. Press., 223-238 p.
- MEADE (R.H.), 1972.** - Transport and deposition of sediments in estuaries. In: **NELSON, B.W.** ed. Environmental framework of coastal plain estuaries. Geol. Soc. of America.
- MILLIMAN (J.D.), SUMMEHAYES (C.P) BARRETO (H.T.), 1976.** - Contribuição ao estudo de material em suspensão na plataforma continental do Amazonas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28o, Pôrto Alegre, Anais v.3, 263- 282 p.
- NITTROUER C. & DeMASTER D., 1987** - Sedimentary processes on the Amazon Continental shelf. Nittrouer & DeMaster Ed. Pergamon Press. Publ., 379 pp. New York.
- OLTMAN (R.E.) 1968.** - Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon River. Washington, D.C.; U.S.G.S., 16 p (circular, 552).
- SIOLI (H.A), 1976.** - Limnologia na região Amazônica brasileira. In: Encontro Nacional sobre Limnologia, Piscicultura e Pesca Continental, 1., Belo Horizonte. Anais, 153- 165 p.
- TEIXEIRA (C.) 1973.** - Relative rates of photosynthesis and standing stock of the net-phytoplankton and nanoplankton. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, (13):53-60.
- TEIXEIRA (C.) TUNDISI (J.), 1967.** - Primary production and phytoplankton in equatorial waters. *Bulletin of Marine Science*, 17(4):884-891, 1967 .

FIGURES

Figure 1 :

- *LANDSAT MSS-5 mosaic, Barra Norte - Amazon River, after Herz and Maluf (1975).*

Figure 2 :

- *Distribution of the marine of fluvial water's predominance and of superficial salinity, after Magliocca (1971).*

Figure 3 :

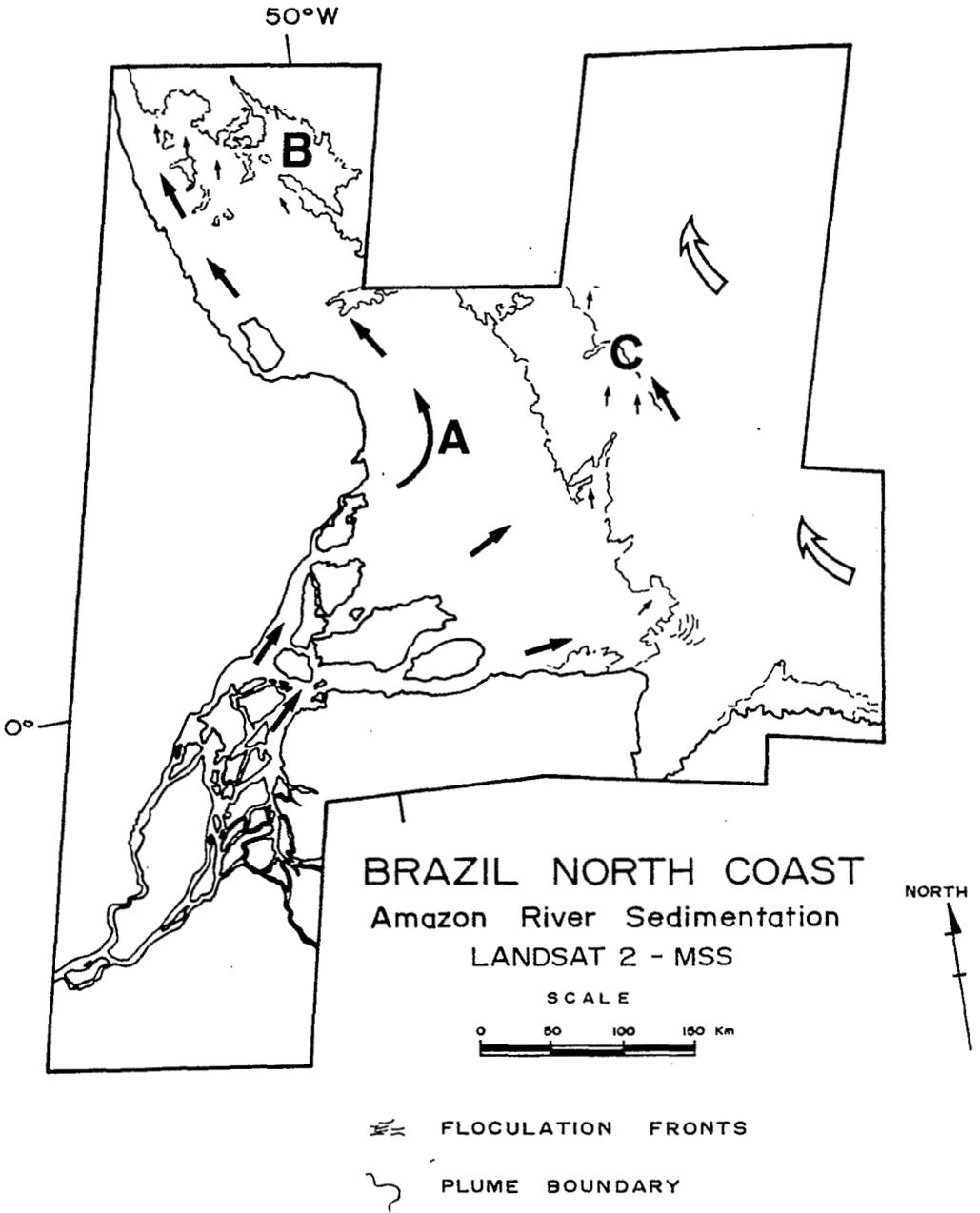
- *Different situations of the coastal processes at Barra Norte, according to LANDSAT images, of 7 July 75 and 26 August 76, interpretation.*

Figure 4 :

- *Suspended material dispersion processes detected by LANDSAT-2 in 17 and 18 of December of 1975 for the paths 241 and 242, points 11 and 13.*



Figure 1 :
- *LANDSAT MSS-5 mosaic, Barra Norte - Amazon River, after Herz and Maluf (1975).*



BRAZIL NORTH COAST PHYSICAL OCEANOGRAPHY PATTERNS

After MAGLIOCCA (1971)

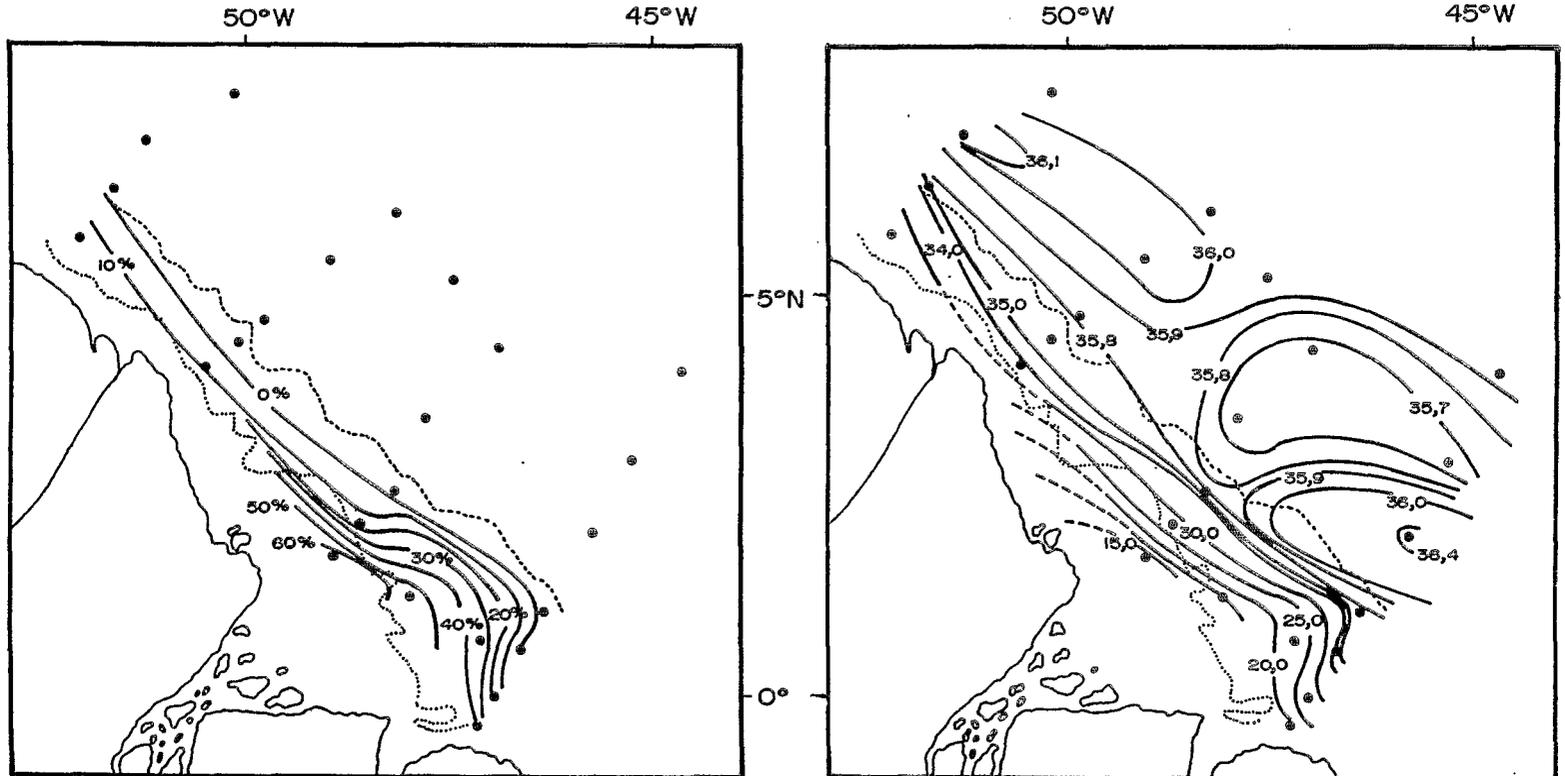
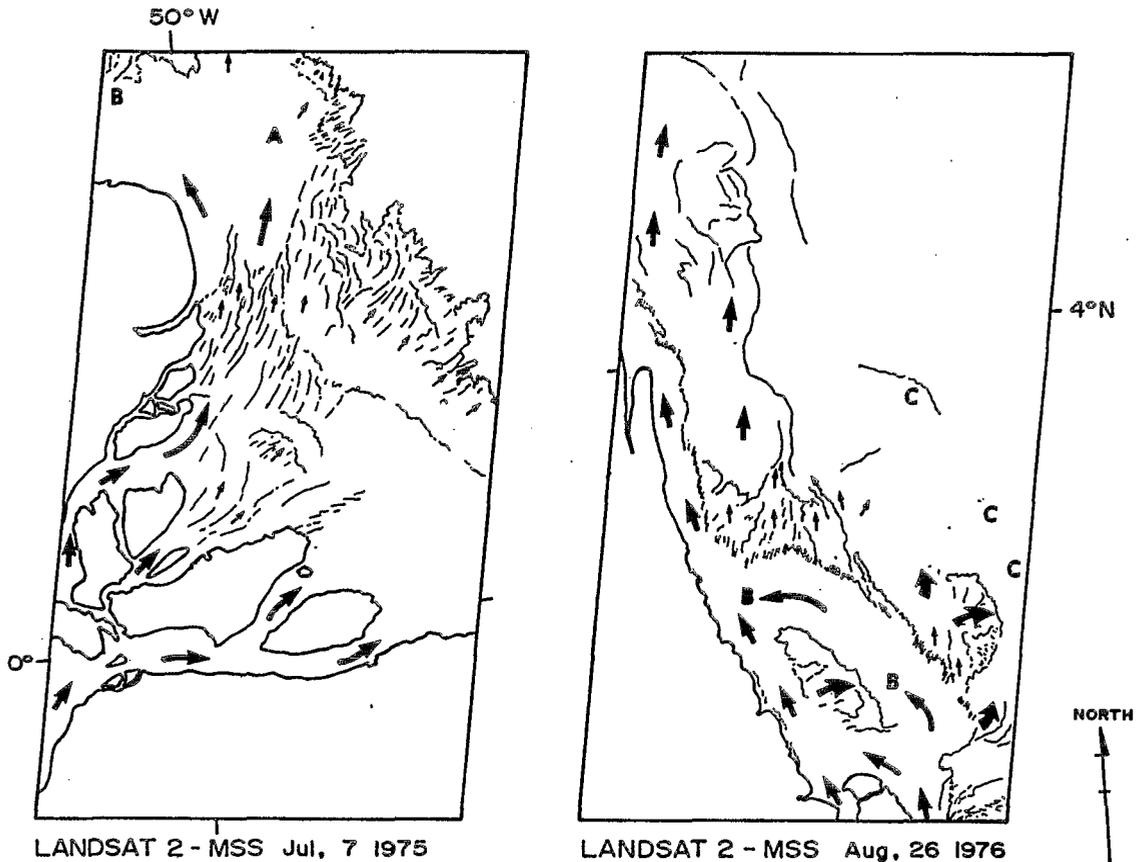




Figure 3 : Different situations of the coastal processes at Barra Norte, according to LANDSAT images, of 7 July 75 and 26 August 76, interpretation

BRAZIL NORTH COAST - Amazon River Sedimentation



== FLOCULATION FRONTS

~ PLUME BOUNDARY

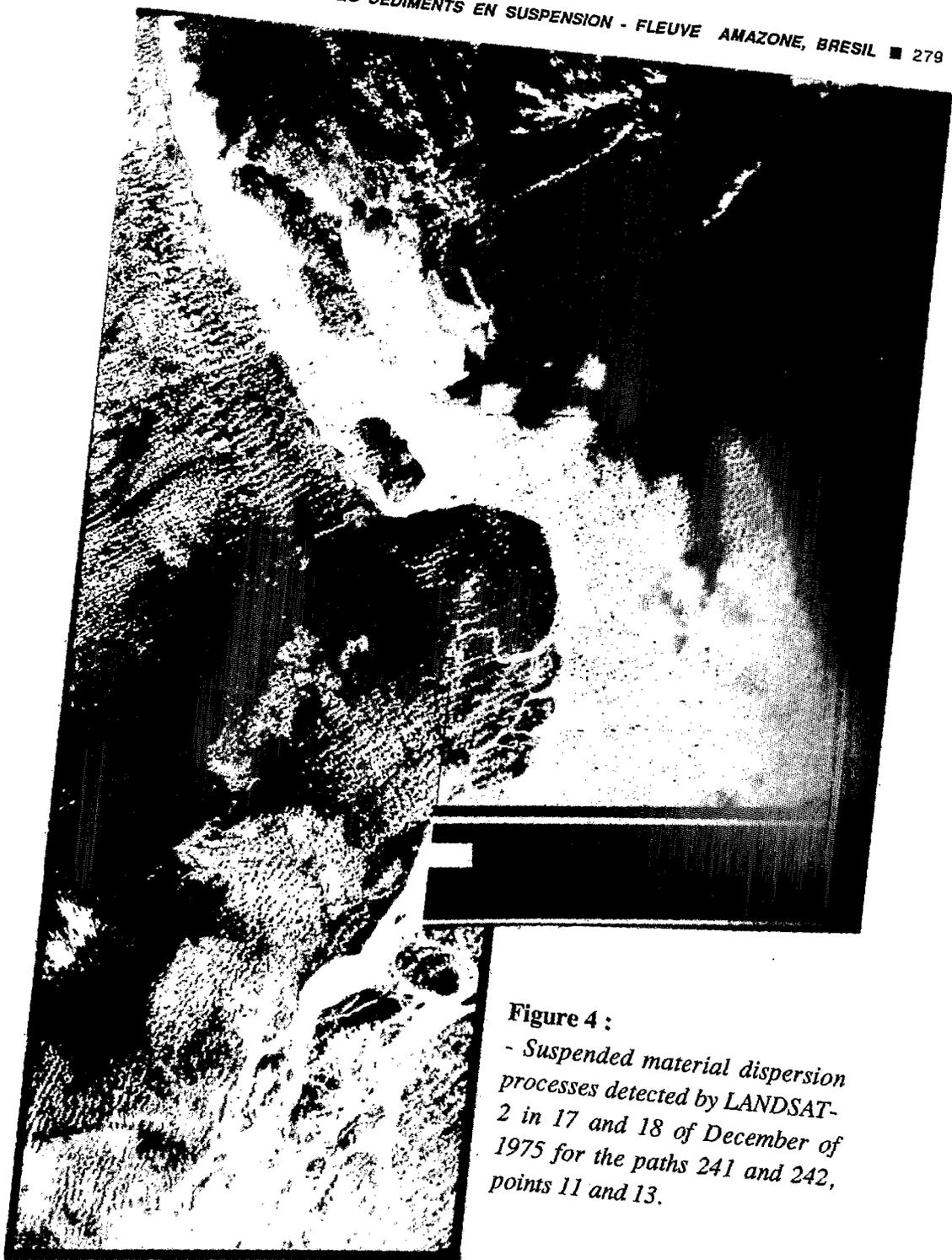


Figure 4 :
*- Suspended material dispersion
processes detected by LANDSAT-
2 in 17 and 18 of December of
1975 for the paths 241 and 242,
points 11 and 13.*

