

MORPHOLOGIE DES FONDS DE L'ESTUAIRE DE GUAMÁ- BELÉM (BRÉSIL)

Odete Fatima Machado da SILVEIRA ¹

Luis Ercilio do Carmo FARIA JR ¹

Résumé

L'estuaire du Guajará, dans la ville de Belém, a fait l'objet d'études hydrodynamiques, physiques, chimiques et sédimentologiques. L'analyse bathymétrique et sonographique (sonar latéral) des fonds estuariens a été faite dans le but d'intégrer ces nouvelles données aux études hydrodynamiques et de mieux évaluer l'influence des courants superficiels et de fond dans la morphologie de l'estuaire (fonds, bancs de sable, chenaux et les rives estuariennes).

L'identification des mécanismes des courants a fourni la base nécessaire pour l'établissement d'un document sur les variations hydrodynamiques locales et pour la comparaison avec d'autres milieux sédimentaires actifs. L'établissement d'un modèle morphologique est cependant difficile car la région du port de Belém, située sur la rive droite de l'estuaire, est soumise fréquemment à des dragages. Mais cet impératif démontre, par ailleurs, la forte action des courants dans le transport des sédiments estuariens.

ABSTRACT

The Guajara Estuary, located around the Belém city, has been studied in the recent years in its hydrodynamic, physical and chemical aspects. The qualitative and quantitative distribution of its sediments has been investigated as well. In this work, the analysis of echosounders and sonographic profiles in association with tidal current recorders should point out new and important data about the relations between the hydrodynamical parameters, sedimentation and morphology of the Guamá-Gujará System. The analyses of Side Scan Sonar records disclosed a wide range of bottom morphological features: sand wave fields, current lineations as well as sedimentary furrows. The furrows were developed in the muddy facies, and show bifurcations in one or two directions in response to alternating currents. The sandy facies were morphologically characterized by sand wave fields and currents lineations. The first one are approximately 400 m long and 185 m wide. The current lineations are predominantly NE-SW and have a sharp definition principally near the boarder of the sand wave field and in the sandy facies of the Guamá River. Megaripples are present in the lateral lee side and in the smooth surfaces between couples of sand waves crests suggesting secondary fluxes development.

Mots clés : Estuaire du Guajará, Brésil, morphologie des fonds, sonographie.

Key-Words: Guajará Estuary, Brasil, bottom morphology, sonography.

(1) UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ (PROMAR/DGL/CG) - BELÉM

INTRODUCTION

L'estuaire de Guajará est localisé à la confluence des fleuves Guamá et Guajará-Açú, à 120 km de l'Océan Atlantique. Au cours des dernières années, cet estuaire a fait l'objet d'études hydrodynamiques, physiques, chimiques et sédimentologiques (PINHEIRO, 1987; PINHEIRO ET FARIA JR., 1987; BERNARDI et al., 1988) (fig. 1).

L'analyse bathymétrique et sonographique (sonar latéral) des fonds estuariens a été faite dans le but d'intégrer ces nouvelles données aux études hydrodynamiques et de mieux évaluer l'influence des courants superficiels et de fond dans la morphologie de l'estuaire (fonds, bancs de sable, chenaux et les rives estuariennes).

L'identification des mécanismes des courants a fourni la base nécessaire pour l'établissement d'un document sur les variations hydrodynamiques locales et pour la comparaison avec d'autres milieux sédimentaires actifs. L'établissement d'un modèle morphologique est cependant difficile car la région du port de Belém, située sur la rive droite de l'estuaire, est soumise fréquemment à des dragages. Mais cet impératif démontre, par ailleurs, la forte action des courants dans le transport des sédiments estuariens.

I - DISTRIBUTION ET IRREGULARITE DES COURANTS DANS L'ESTUAIRE

D'une manière générale les courants de surface du fleuve Guamá atteignent des valeurs maximales absolues pendant la marée haute (180 cm/sec) alors qu'à marée basse ces valeurs sont moindres (150 cm/sec)².

Sur le terrain, une certaine irrégularité à été observée dans la direction des courants de marée, les valeurs maximales se situant dans le chenal le plus profond de la rive gauche. Cette irrégularité s'accroît pendant les marées de quadrature³: les courbes des variations des vitesses révèlent des fortes oscilla-

(2) Rappelons que les marées basses ont une durée moyenne de plus de 8 heures, alors que les marées hautes ne dépassent pas 5 heures.

(3) Aussi bien pendant les marées hautes qu'au cours des marées basses.

tions au début de la marée haute (BERNARDI et al., 1988) et un décalage d'environ une heure entre les courants descendants et les courants montants (PINHEIRO 1987).

Les irrégularités se produisent simultanément entre la surface et le fond et en fonction des marées : on enregistre des valeurs maximales absolues en surface (40 cm/sec) et en marée haute. A 1 m. de profondeur - et en marée basse - cette valeur diminue (Bernardi et al, 1988) et atteint une vitesse de 40 cm/sec à 2 m de profondeur.

1. Sections courantométriques et sous-zones

Le décalage de l'inversion des courants dans le *chenal principal du fleuve Guamá*, proche de son embouchure, après l'étalement de la marée est de 10 à 15 min, surtout en syzygie⁴ (PINHEIRO, 1987). L'analyse des relations entre les étalements de la marée et les inversions de courants sur la rive du fleuve Guamá (BERNARDI et al, 1988) montre un décalage de presque 40 min pour la marée montante et de 2 heures pour la marée basse. La comparaison entre la zone du chenal principal et les berges démontre que le frottement s'accroît durant la marée basse en relation avec ce qui se passe dans le canal principal.

Dans la *section S5* (fig. 2) du fleuve Guamá, pendant les marées de syzygie il y a une claire prédominance, à 1 m de profondeur, des courants de marée basse, alors que dans les marées de quadrature, l'alternance entre les courants montants et descendants est très nette.

Dans la *région portuaire de Belém*, située au long de la rive droite de la baie de Guajará, le jusant de la confluence des fleuves Guamá et Guajará-Açu est protégé des forts courants montants et descendants, ce qui est à l'origine d'une accumulation sédimentaire importante et constante (INPH, 1980/82; PORTOBRAS, 1980).

2. Vitesses maximales et minimales

Les variations de la marée et de la décharge de l'eau douce renforcent la circulation des eaux montantes sur la rive gauche du Guajará-Açu, approfondissent les fonds et provoquant l'érosion du littoral nord de l'île das Onças.

(4) Vives-eaux.

En ce qui concerne les vitesses maximales moyennes (PINHEIRO, 1987):

* elles sont fortes pendant les marées hautes de syzygie, à 1 m de profondeur;

* elles sont plus faibles lors des marées basses de quadrature, à la même profondeur.

En ce qui concerne les vitesses maximales absolues elles se produisent :

* dans le cas de la section 1 (fig.2), pendant la marée descendante de syzygie (174 cm/sec);

* dans la section 2, durant las marée hautes (210 cm/sec), (section S2).

Pendant les marées de syzygie, les courants atteignent des vitesses maximales de l'ordre de 3 h après l'étale de la basse mer et 3 h 30 minutes après l'étale de la haute mer, alors que pour les marées de quadrature les courants atteignent des vitesses maximales approximativement 4 heures après l'étale de la haute mer et 5 heures après l'étale de la basse mer.

C'est également pendant les vives-eaux que les vitesses maximales de la marée montante sont observées tout d'abord dans les chenaux de Meio de Pôrto et dans le chenal de l'Ile das Onças (respectivement 2 h, 3 h et 4 h après la marée basse. Pinheiro, 1987). Dans le chenal de Pôrto, par contre, les flux de la marée basse atteignent des vitesses maximales dans la section S1 seulement après 30 à 40 minutes..

Dans la section S2, les courants de marée basse sont presque synchrones dans les chenaux do Pôrto et de l'Ile das Onças. Les plus grandes vitesses dans la section S1 (fig. 2) se produisent dans le chenal de l'Ile das Onças, 3 heures après la marée haute, alors que dans les chenaux do Pôrto et do Meio, les maximums ont lieu respectivement 3 h 30 minutes et 4 h 30 minutes après la basse marée.

Enfin, les types des marées sont à l'origine des modifications dans les vitesses des courants de fond. Les vitesses maximales à 1 m du fond ont lieu pendant les vives-eaux, alors qu'à la même profondeur, elles chutent au cours des basses marées de quadrature. Les vitesses maximales des courants de fond atteignent 172 cm/sec au point 5 de la section S2 et 162 cm/sec au niveau du point 7 de la section S1 pendant les grandes marées. Ceci montre un comportement similaire à ceux des courants de surface, malgré un décalage d'environ 2 h 30 minutes par rapport à ceux-ci.

II - L'ANALYSE BATHYMETRIQUE

Les modifications de la morphologie estuarienne sont connues depuis 1843, grâce à des documents de l'époque. Au début du siècle, la construction du port de Belém (1906) a été l'occasion d'obtenir d'autres données sur les fonds estuariens. L'ensemble de ces observations a été comparée, dans les années 80, aux résultats obtenus par PORTOBRAS (1980) et PINHEIRO (1987). Il apparaît que des chenaux autrefois profonds et étendus ont disparu et que de nouvelles zones d'accumulation de sédiments ont été formées.

Quatre provinces morphologiques principales existent à présent dans l'estuaire de Guajará (PINHEIRO, 1987), à savoir: (1) Le haut fond de la baie; (2) le chenal de l'île das Onças; (3) la barre do Guajará-Açú; (4) la basse vallée du fleuve Guamá (fig.3).

1- Le haut fond de la baie

Le haut fond de la baie, formé par des bancs et de chenaux peu profonds (<10 m) comprend la bordure Est de la baie de Guajará dans le fleuve Guamá (PINHEIRO, 1987).

Trois bancs majeurs caractérisent la morphologie : Sul da Cidade, Meio et Cidade.

* Le premier suit le littoral sud de Belém, à partir de l'embouchure du fleuve Guamá jusqu'au début de la baie de Guajará (fig.4). Ce banc s'est développé vers l'Ouest, simultanément à la migration du chenal de l'île das Onças dans la même direction. Un chenal intermédiaire, de faible profondeur, orienté E-W, est à l'origine de l'individualisation de la portion sud du banc Sul da Cidade, déplacée vers la rive droite du fleuve Guamá (fig.6).

Il est très vraisemblable que l'origine et les modifications subies par ce banc soient liées à des modifications d'énergie des courants des marées hautes (PINHEIRO, 1986). En effet, leurs vitesses moyennes (en syzygie et en quadrature) sont supérieures à celles des marées basses. Par contre, la durée des courants descendants est plus longue que celles des marées montantes, et cela à n'importe quelle profondeur. Ainsi, quand les courants de la marée haute rencontrent ceux de la marée basse en provenance du fleuve Guamá, il se produit - sur la rive droite du fleuve - une résultante nord et nord-est. L'énergie dégagée est suffi-

sante pour provoquer l'érosion des sédiments sableux du fond et pour maintenir le chenal intermédiaire du banc (fig.04).

*Les bancs do Meio et da Cidade sont peu individualisés et peu profonds (< 1.5 m de profondeur), séparés par le chenal do Meio qui, après suivre le littoral de l'île das Onças, était dévié vers le centre de la baie (SANTOS, 1982). Actuellement, ce canal s'exhausse lentement sous l'action d'une accumulation sableuse.

2- Le chenal de l'île das Onças

C'est la principale partie de la baie de Guajará dont la largeur est de 1 km et les profondeurs varient de 10 à 17 m.

Le chenal de l'île das Onças se situe dans le prolongement du thalweg du fleuve Guamá. Il est actuellement en phase de déplacement vers le littoral de l'île voisine produisant un double chenal à partir de l'embouchure du fleuve Guamá (fig. 5). Le chenal principal correspond à celui de l'île das Onças, et son déplacement est à l'origine de l'érosion du littoral est de l'île.

La dépression de la Pointe de Pôrto-Alegre - avec 23 m de profondeur - est la plus importante de la baie et responsable de la configuration du chenal de l'île das Onças (fig.6) : le chenal, qui se développe vers l'ouest, diminue graduellement de profondeur vers le nord.

Le chenal do Meio (chenal Secondaire) est, au contraire, en exhaussement entre le banc da Cidade et le banc do Meio.

3- La barre du Guajará-Açú

À la confluence des fleuves Guamá et Guajará-Açú, s'est développée une barre sableuse (<5 m de profondeur), attaquée par les courants. Ceux-ci sont à l'origine de l'approfondissement et de la migration du chenal (fig.7).

4- La basse vallée du fleuve Guamá

Le fleuve Guamá est le principal affluent du fleuve Pará, et baigne la partie sud de la ville de Belém.

La basse vallée du Guamá s'individualise par rapport aux autres sous-zones : pas d'affluents importants et présence de deux chenaux principaux qui régissent

sa dynamique estuarienne exclusivement en marée basse. Il y a plus de 2 heures d'intervalle entre les courants descendants et montants. Cette différence, ainsi que le régime des vents, sont à l'origine d'un flux très turbulent. Celui-ci provoque l'érosion dans certains secteurs et une accumulation dans d'autres, avec des changements rapides de faciès sédimentaires.

Les ondulations du fond sont associées à des turbulences dont l'axe se situe presque horizontalement, pendant que les courbures des chenaux et les changement de direction du flux donnent origine à des turbulences avec un axe presque vertical (ALLEN, 1966). La carte bathymétrique de la sous-zone 01 (fig.07) montre que dans cette région, le fleuve Guamá possède 2 chenaux séparés par des dépressions, dont la plus importante se trouve à l'embouchure (dépression de Pôrto-Alegre).

Les chenaux du bas-Guamá, situés à la proximité des rives, provoquent leur érosion comme, par exemple, au voisinage du Campus Universitaire de l'UFPA (figs. 11, 12 et 13). Dans ce secteur, l'interaction des courants de marée basse de la crique Tucunduba avec les courants de marée haute du fleuve Guamá crée un régime tourbillonnaire qui accentue le recul des rives.

Au-delà de ces processus spécifiques, liés aux courants et à la disposition du réseau de la basse vallée du Guamá, la solifluxion tropicale contribue également à la destruction des rives.

III - MORPHOLOGIE ET SEDIMENTOLOGIE DANS L'ESTUAIRE DU FLEUVE GUAJARÁ-AÇU

Dans les fonds de l'estuaire du Guajará, s'observent des sillons ("furrows") et des dunes hydrauliques ("sand waves"), formes qui sont en relation avec les faciès boueux et sableux définis par PINHEIRO (1987)(fig.10).

1. Les fonds boueux

Les fonds du fleuve Guamá sont couverts par des boues limoneuses (> de 75% de limon) notamment à la proximité de l'embouchure de la crique Tucunduba, dans le Furo da Paciência et sur la rive droite de la baie de Guajará. Des sédiments mixtes (sables, vases) apparaissent ponctuellement (en face du Iate Clube du Pará et à l'extrême ouest de l'île do Cumbú). Les sédiments fins

sont exposés le long des rives estuariennes pendant les marées basses, sous forme des plages boueuses (fig.11).

La forme la plus significative de ces fonds sont des sillons longitudinaux, constitués par des sédiments fins compactés⁵.

Dans l'estuaire de Guajará, les sillons se distribuent longitudinalement à l'axe le plus long des chenaux. Parfois les sillons s'unissent pour former un seul, orienté selon la direction prédominante du courant.; parfois ils se rejoignent pour ensuite se séparer dans des directions opposées. Quoi qu'il soit la morphologie de détail, la genèse des sillons est liée aux courants des marées qui circulent alternativement dans deux directions (fig.12 et 13).

L'interprétation des registres sonographiques et de l'hydrodynamique de cette zone montre que les directions prédominantes de ces courants se situent entre : -240 et 270 Az pendant les marées basses de quadrature et à 1 m du fond, et à - 210 et 240 Az pendant les marées basses de syzyzie et à la même profondeur.

La bifurcation des sillons résulte vraisemblablement de l'interaction de ces courants avec les courants opposés aux marées hautes (tant de quadrature que des vives-eaux). L'interprétation s'appuie aussi sur le fait que la distribution des courants de surface présente, dans la même zone, des directions préférentielles entre 240 et 270 Az, pendant les marées basses des vives-eaux et entre 90 et 120 Az au cours des marées basses de quadrature. Les vitesses des courants diminuent vers le fond, en raison de l'absence d'autres agents extrêmes comme le vent.

La jonction des chenaux résulte de l'alternance de l'action des courants (fig.12). Le caractère érosif se traduit par des formes anguleuses, similaires à des dents de scie, enregistrés par sonographie.

2. Les fonds sableux

Les sédiments sableux et sablo-limoneux occupent près de 75% des fonds estuariens. Les sables forment les bancs et comblent en partie les principaux chenaux; les sables-limoneux sont dispersés dans l'axe central du rio Guamá et de la baie de Guajará (fig.10).

(5) Ces sillons peuvent se développer dans n'importe quel type de sédiment, à condition que les vitesses des courants estuariens, responsables de leur formation, dépassent 0,5 m/s (FLOOD, 1983)

Le chenal de l'île das Onças est parcouru par les marées basses de quadrature et de syzygie (PORTOBRAS, 1980). Dans le chenal - profond de 19 m - les vitesses de courants augmentent et décroissent en peu de temps. La durée des courants des marées basses, plus longue, dépasse 2 heures, celle des marées hautes.

Les registres sonographiques révèlent des dunes hydrauliques elliptiques, avec une extension de près de 400 m et une largeur de 185 m. Ces dunes présentent des longueurs d'onde moyennes de 90 m et sont inclinées vers l'embouchure du fleuve, ce qui confirme que leur développement résulte notamment des courants des marées descendantes et de la circulation fluviale.

Des différences sont relevées dans les crêtes, rectilignes ou sinueuses (fig. 14). Leur hauteur moyenne se situe entre 0,65 et 1,35 m et on observe des mégarides qui se développent latéralement en crêtes principales, dans les parties lisses entre les dunes. Ces formes résultent des flux secondaires, obliques à la direction du courant principal. Dans la zone de dunes, on trouve également des linéaments de courant⁶ avec des directions NE-SW (fig.15).

CONCLUSION

Dans la zone étudiée les processus hydrodynamiques en général et les courants en particulier sont les principaux agents modificateurs de la morphologie des fonds et des structures sédimentaires en sont associées.

Dans l'estuaire du fleuve Guamá les sillons caractéristiques des zones argileuses apparaissent dans les axes les plus long des chenaux. La bifurcation des sillons révèle l'interaction des courants fluviaux et des courants des marées (cycle de la marée semi-diurne).

Les formes des fonds sableux sont directement liées aux zones profondes du chenal de l'île das Onças où les "sand waves" ont les flancs au vent orientés vers l'embouchure du fleuve. C'est dire que ces flancs dérivent surtout des courants de marée basse et secondairement du flux fluvial.

L'activité hydrodynamique dans l'estuaire du Guajará-Açu est intense. L'intérêt de l'emploi du "Side Scan Sonar" à des fins scientifiques (étude des modifi-

(6) Il est important de souligner que le terme de "linéament de courant" a un sens plus descriptif que génétique.

cations des fonds estuariens) et/ou pratiques (détection d'épaves de bateaux, présence de câbles télégraphiques, qui peuvent causer de sérieux problèmes pour la navigation dans la région) n'est plus à démontrer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEN, JLR 1966 - On Bed Forms and Paleocurrents *Sedimentology*, 6: 153-190
- BERNADI, W. ; PINHEIRO, R. V. L. & COSTA JUNIOR, P.S. 1988- Analise correntométrica do Rio Guamá próximo a desembocadura do Igarapé Tucunduba. In Anais do XXXV Congr. Bras. de Geol., Belém, Soc. Bras. Geol., p. 528-533.
- FLOOD, R.D. 1983- Classification of sedimentary furrows and a model for furrow initiation and evolution. *Geol. Soc. Am Bull.*, 94 :630-639.
- MACHADO, I. H. & COSTA JR, P. S. 1986 - Análise batimétrica do Rio Guamá nas imediações do Campus Universitário. TCC. Belém, UFPA. 48p.
- PINHEIRO, R. V. L. 1987 - Estudo Hidrodinâmico e Sedimentológico do Estuário Guajará Belém. 152p. (Tese de Mestrado -UFPA).
- PINHEIRO, R. V. L.; FARIA JR, L.E.C 1987 - Processos Sedimentares Recentes no Estuário Guajará Belém. Anais do 1º Cong. ABEQUA. V.1: 119-132. Porto Alegre.
- PORTOBRAS 1980 - Porto de Belém - Transporte de Material Solido em Suspensão na Baía de Guajará. Rel. INPH.147/80. Rio de Janeiro, 170p.
- PORTOBRAS 1980 - Medições de Corrente e Material em Suspensão Junto ao Porto de Belém. Rel INPH 80/82, código Belém 740/01. Rio do Janeiro, 162p.
- SANTOS, J.A. 1982 - Porto de Belém - Análise dos Estudos Realizados Sobre a Sedimentação na Area Portuária Rel. INPH 80/82. código 170/01. Rio de Janeiro.160p.
- SUGUIO, K.& BIGARELLA, J.J. 1979 - Ambientes de Sedimentação: sua Interpretação e Importância. Curitiba, UFPr. 181p.
- SWIFT,D.J.P. FREELAND, G.L. 1978 - Current Lineations and Sand Waves on the Inner Shelf, Middle Atlantic Bight of North America.*Journal of Sed. Petrology.*, 48(1): 1257-1266.

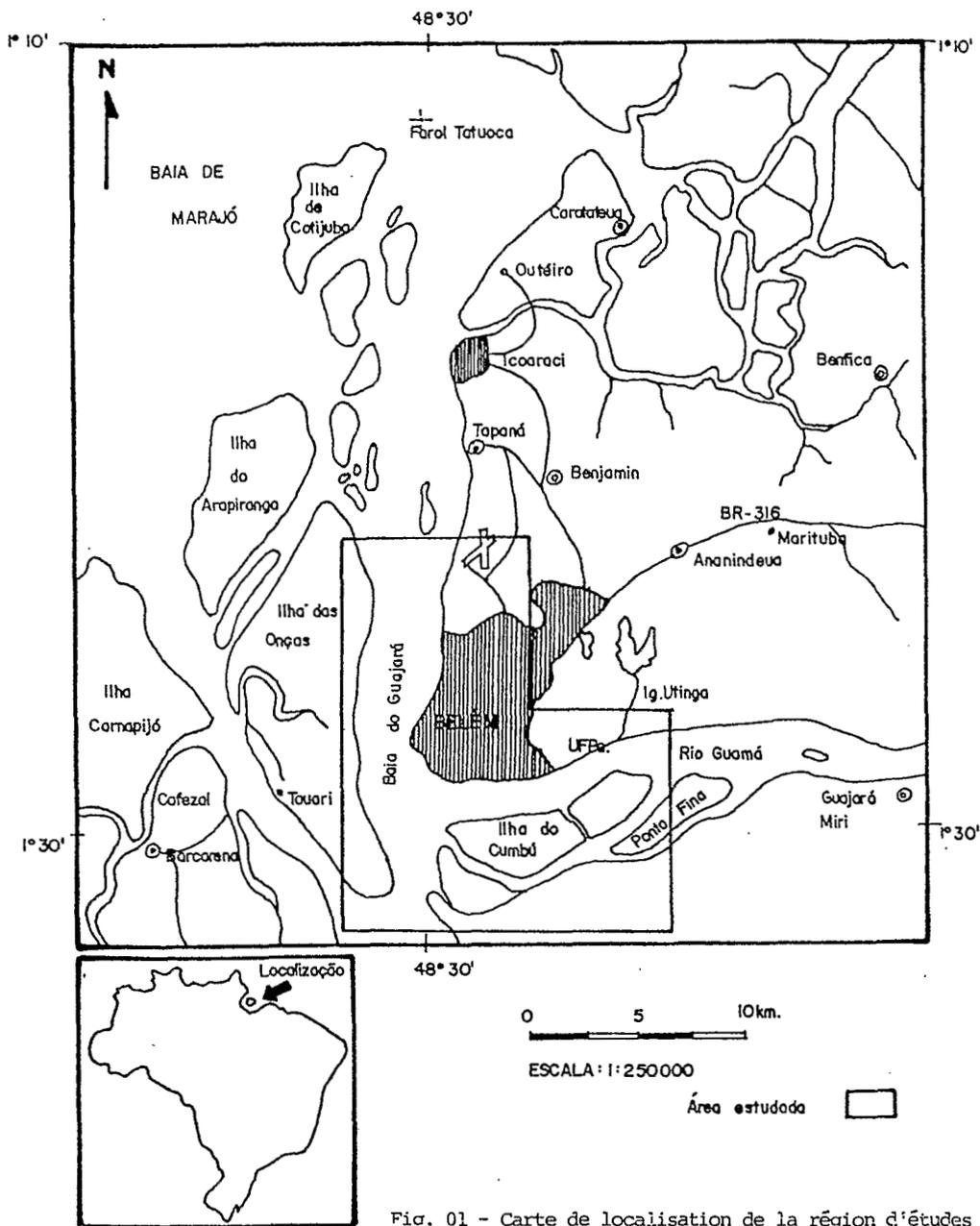


Fig. 01 - Carte de localisation de la région d'études

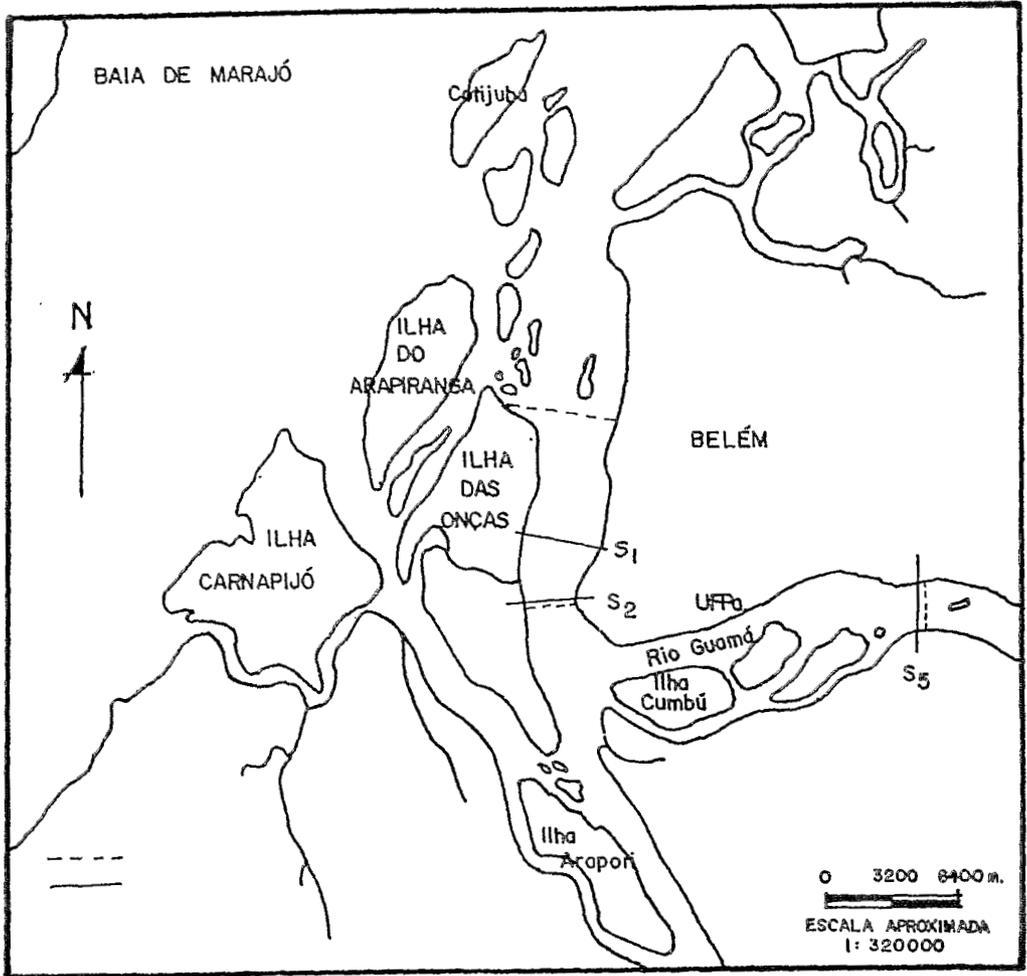
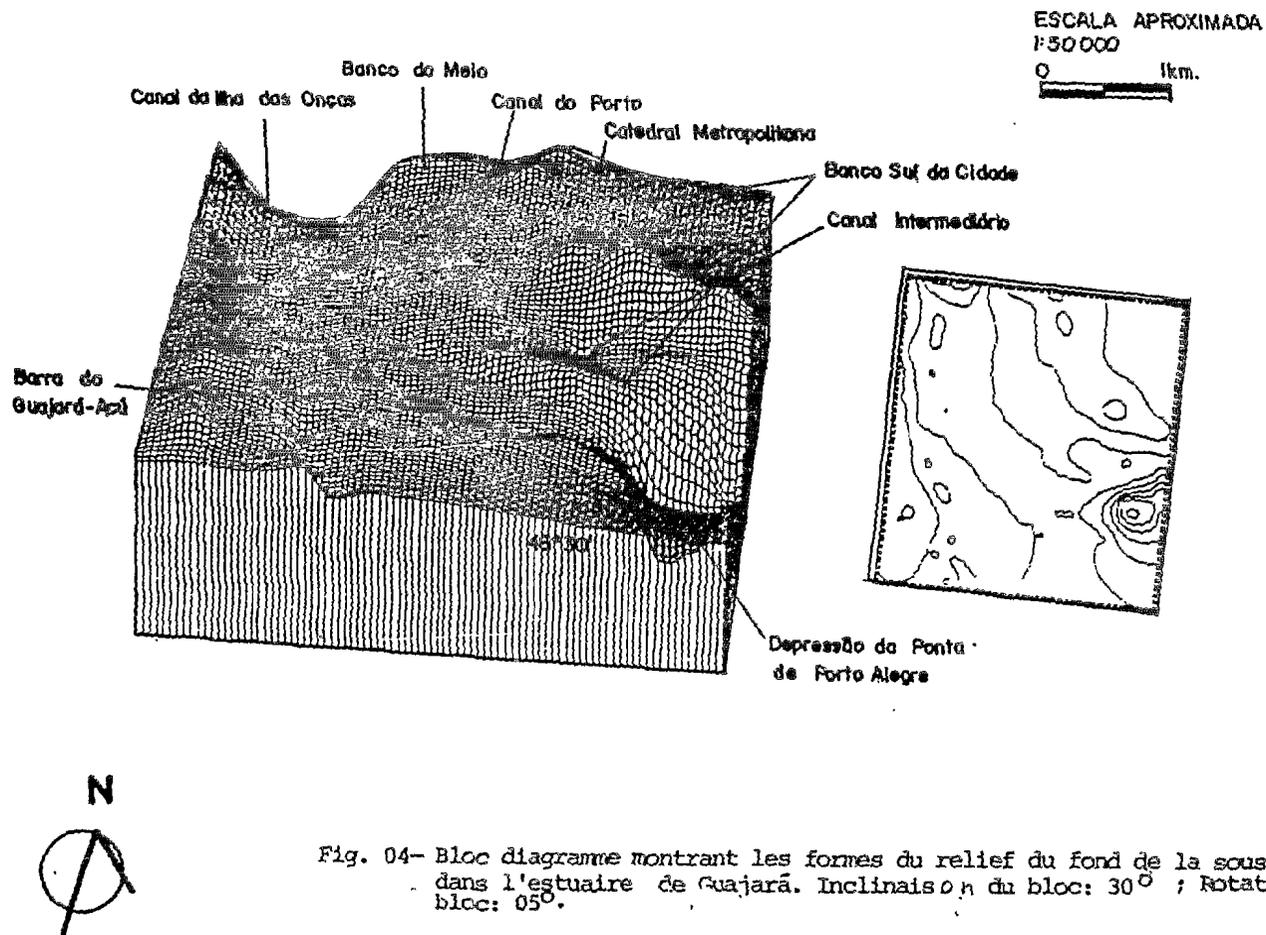


Fig. 02- Carte de localisation des sections correntométriques et des sous-zones. Modifiée par POPTCBRÁS (1980)



ESCALA APROXIMADA

1: 50000

0 1 km.

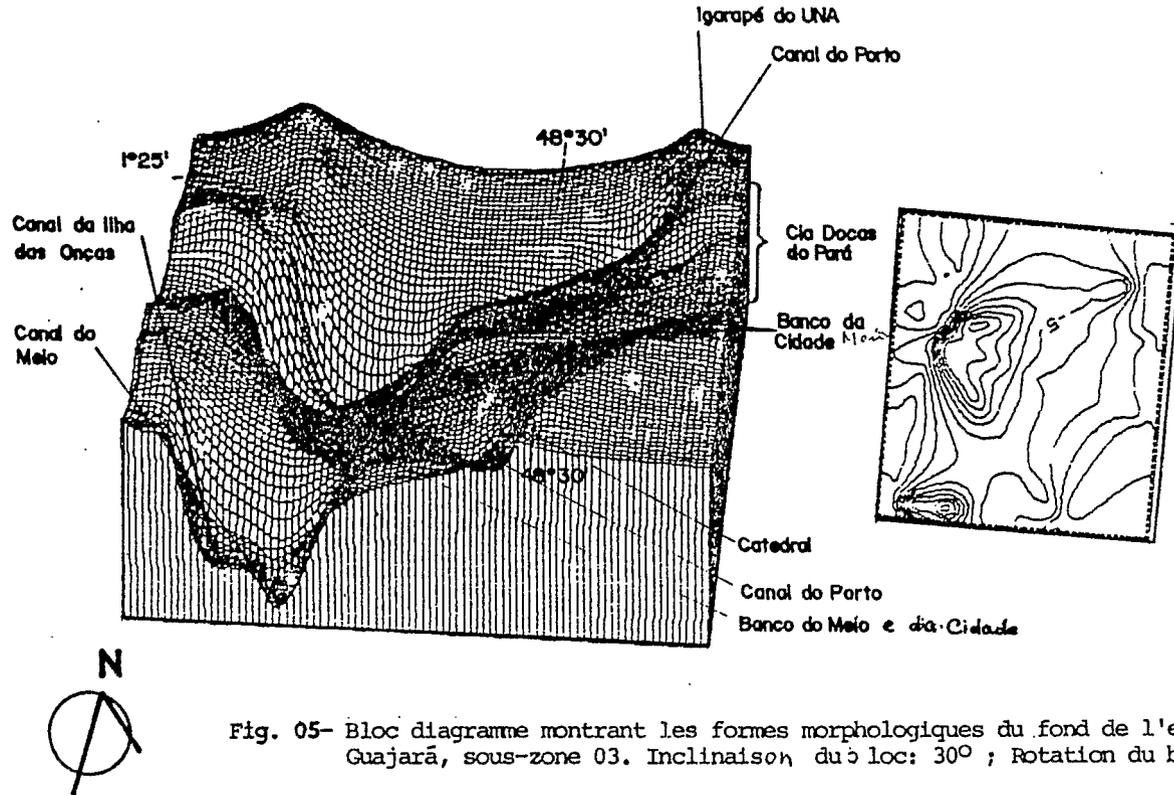
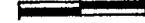


Fig. 05- Bloc diagramme montrant les formes morphologiques du fond de l'estuaire de Guajarã, sous-zone 03. Inclinaison du bloc: 30° ; Rotation du bloc: 05°

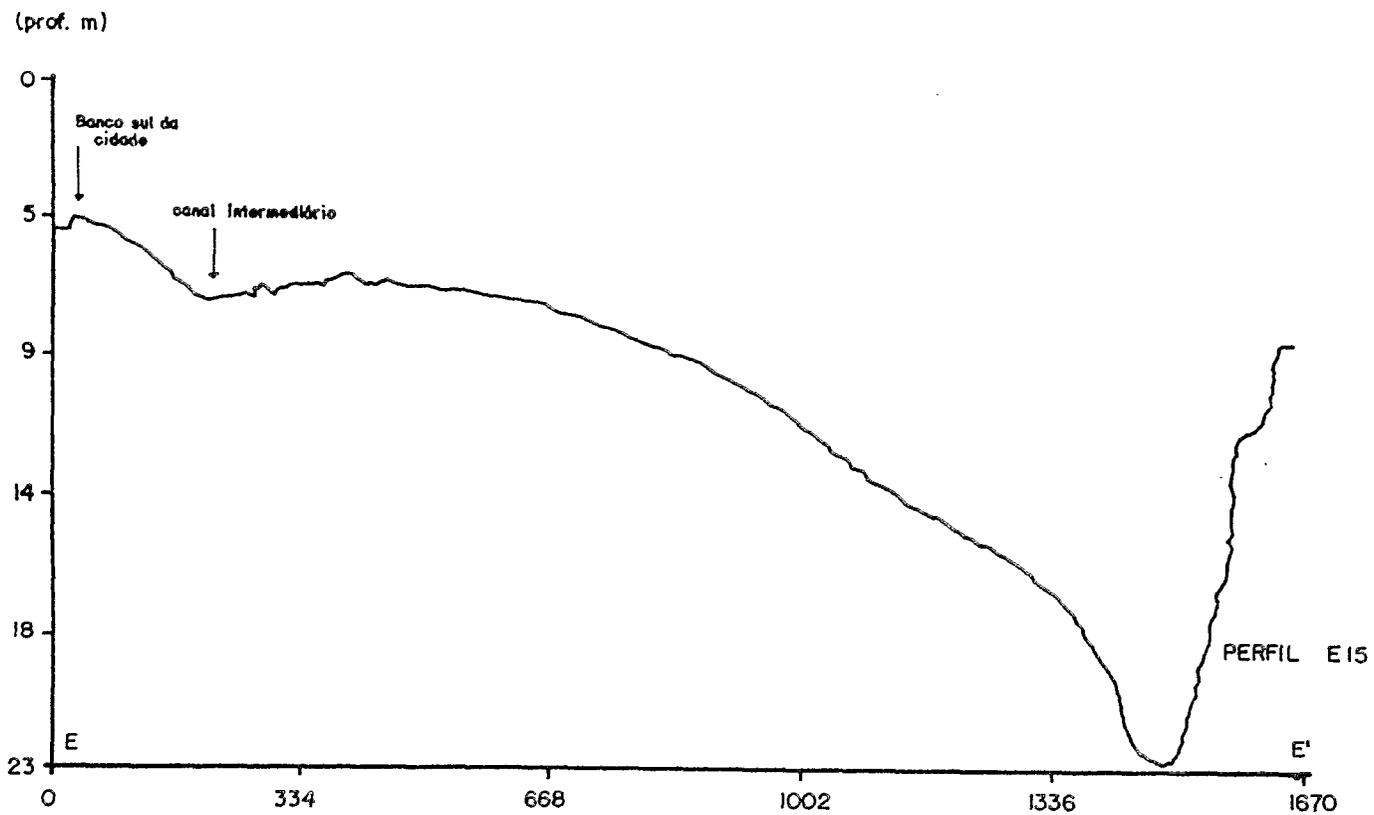


Fig. 06- Perfil E-E' representant la configuration bathymétrique de la Dépression de la Pointe de Porto Alegre. (distância m)

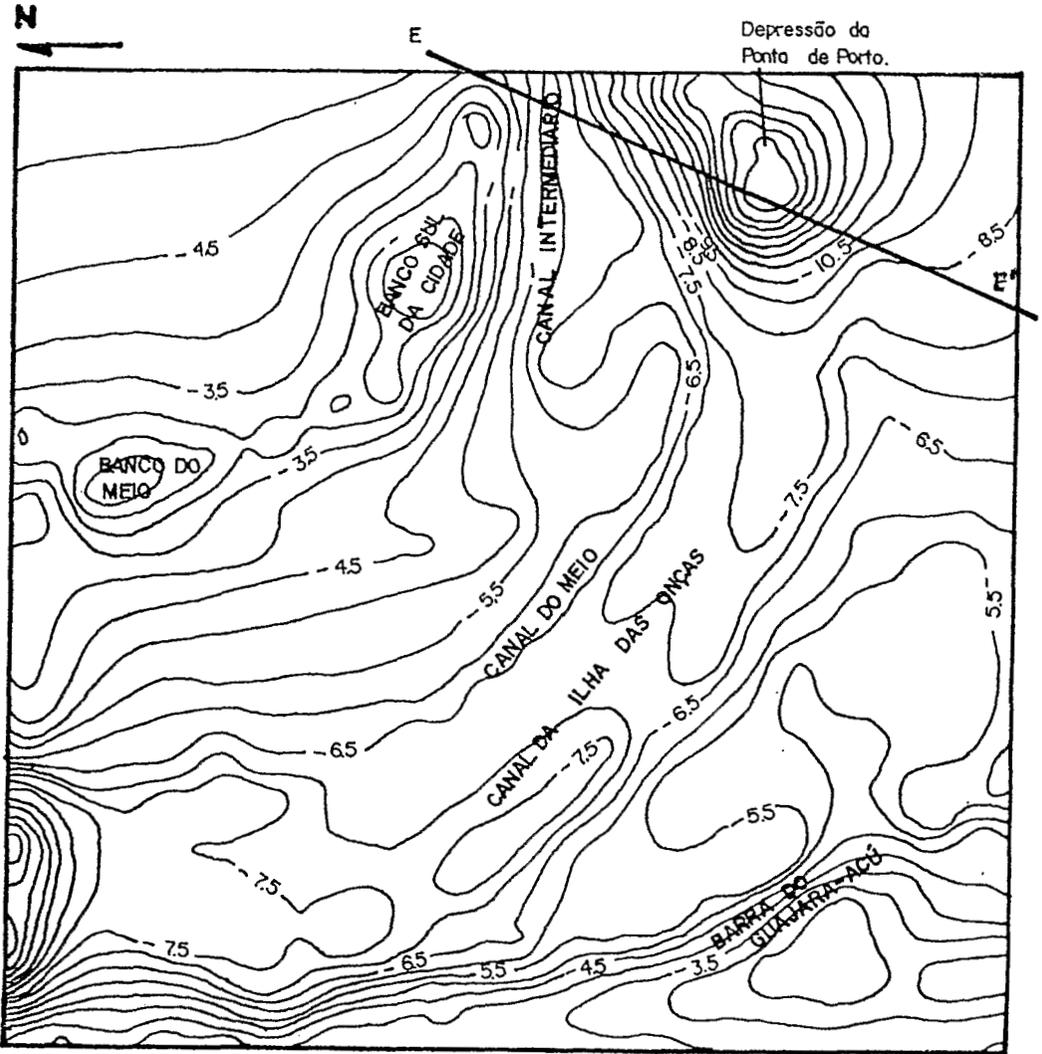


Fig. 07 - Carte bathymétrique du fond de la baie de Guajará dans la sous-zone 02. L'intervalle des courbes est de 0,5m.

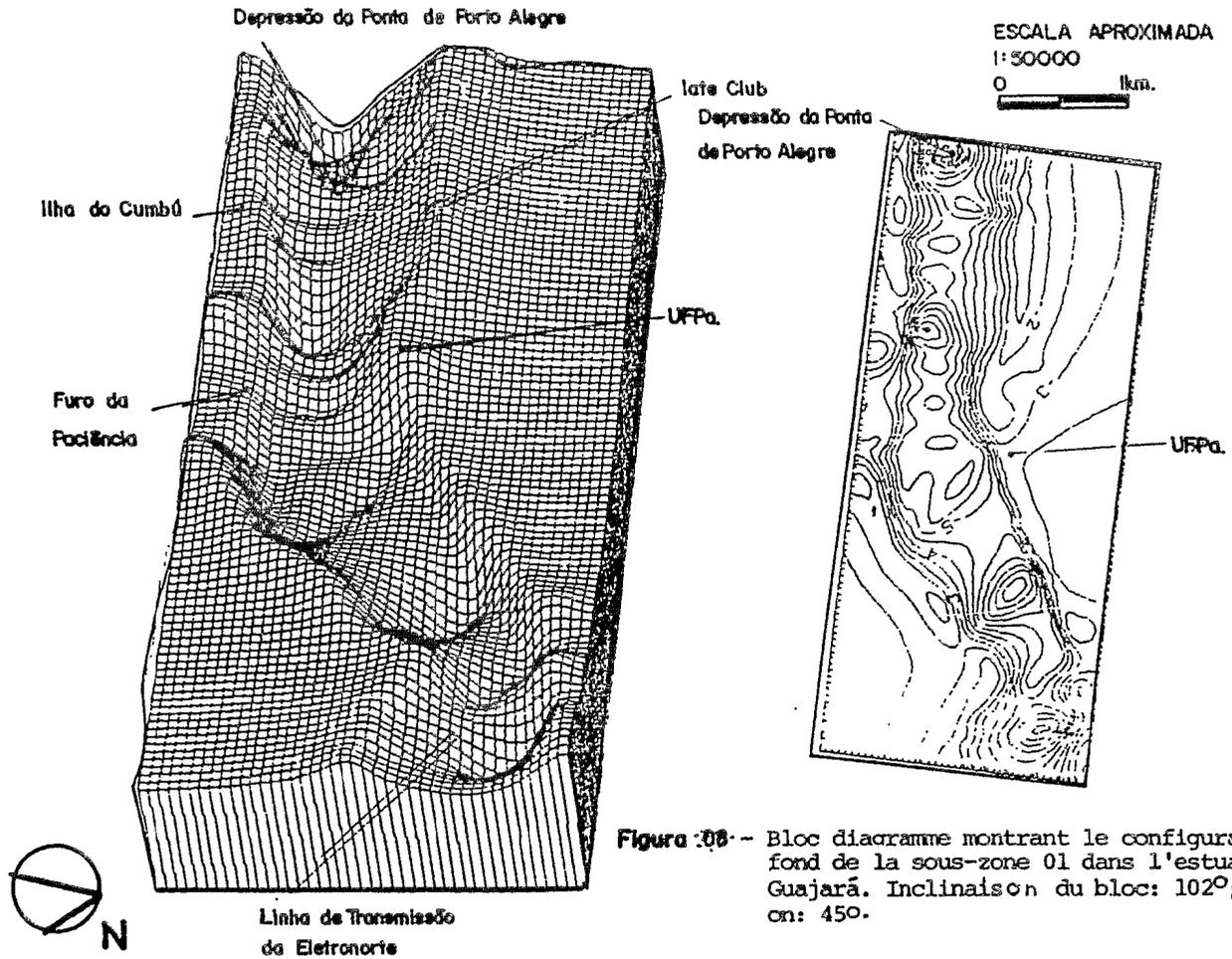


Figura 08 - Bloc diagramme montrant la configuration du fond de la sous-zone 01 dans l'estuaire de Guajará. Inclinaison du bloc: 102°; Rotation: 45°.



Figure 09 - Aspects de l'érosion sur la rive du fleuve Guamá, à proximité du Campus Universitário do Guamá - UFPA - Belém

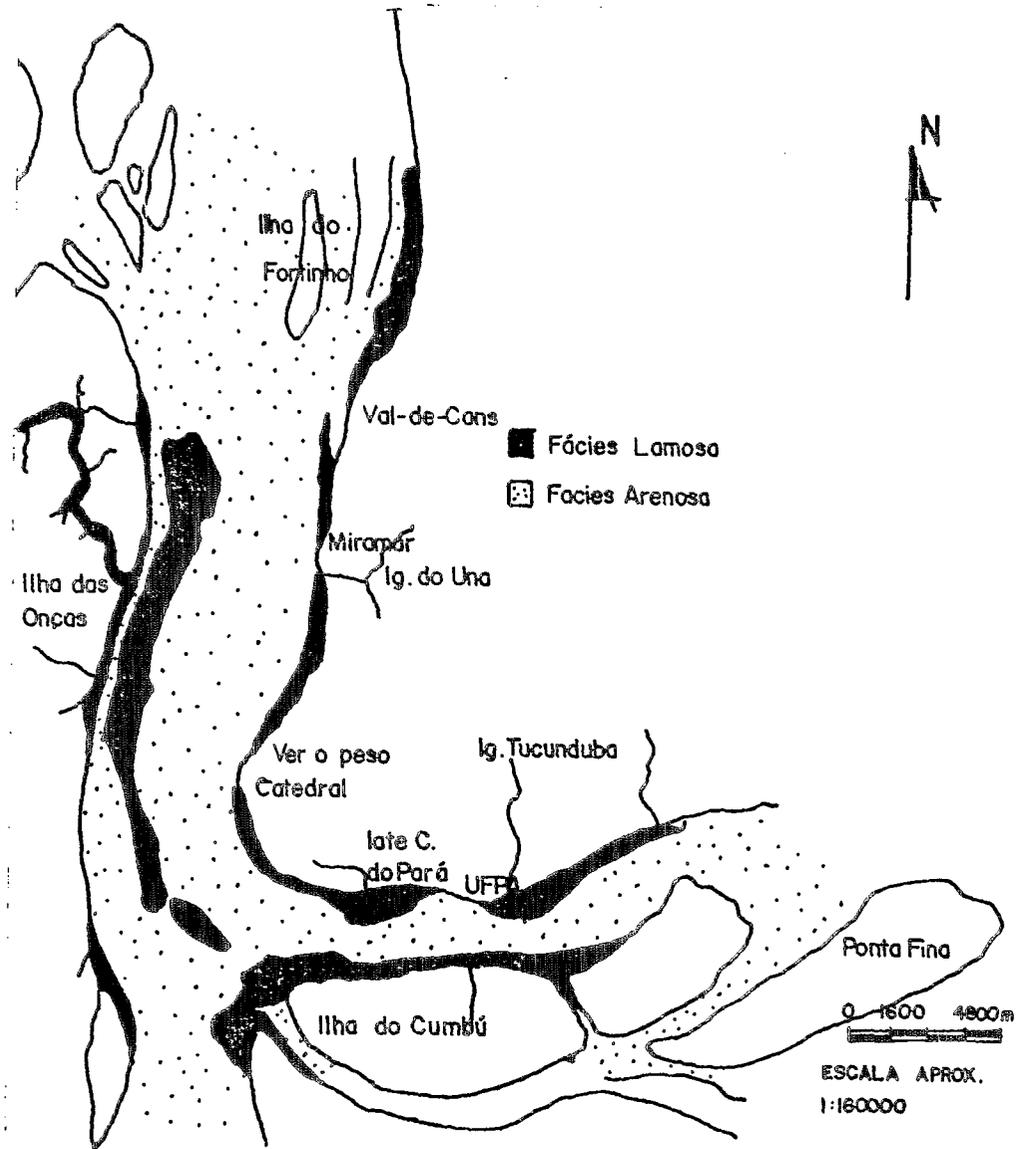


Fig. 10 - Carte de distribution des faciès boueux et sableux, modifiée par Pinheiro (1987).

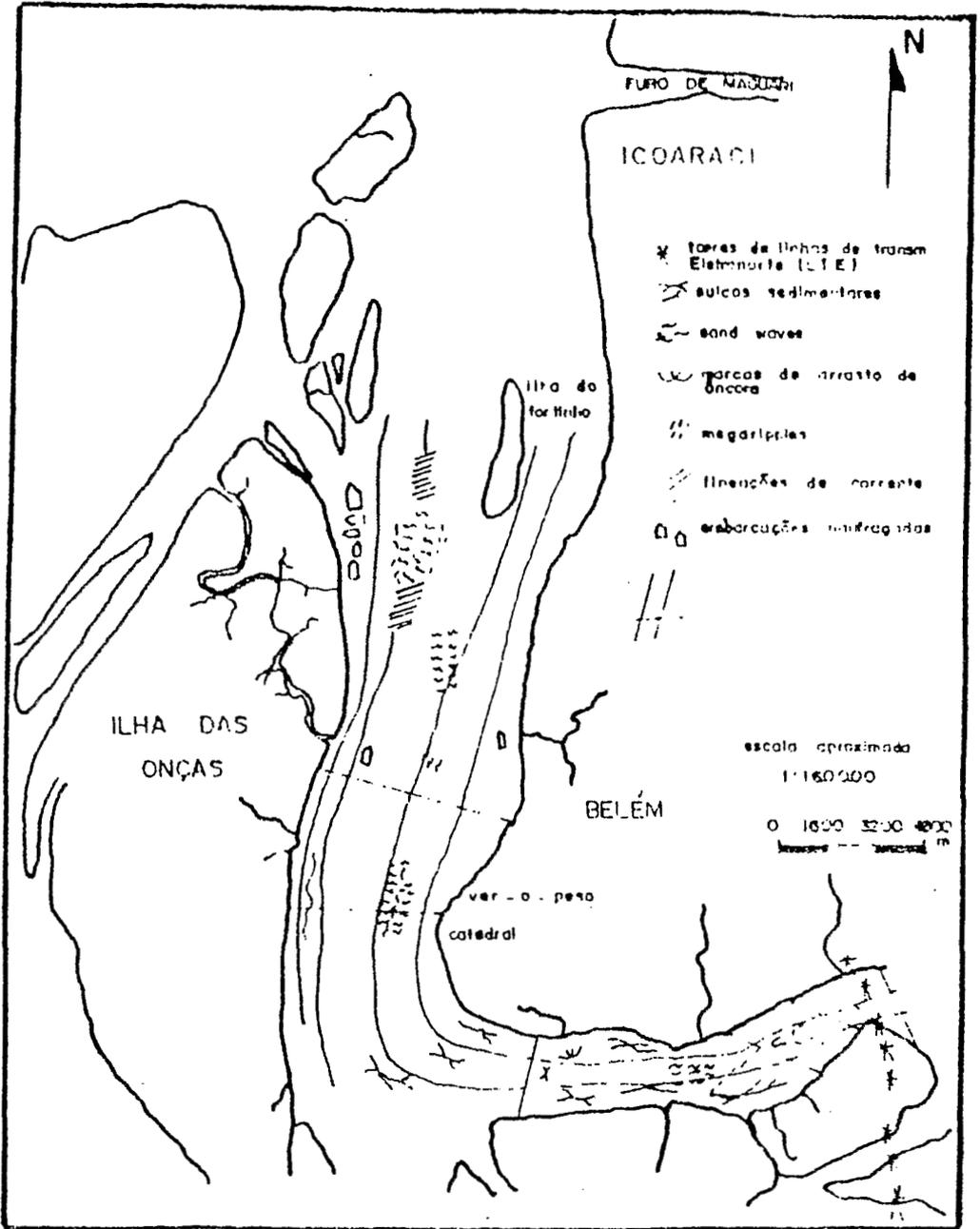


Fig. 11 - Carte de distribution des formes de fond dans la baie de Guajará

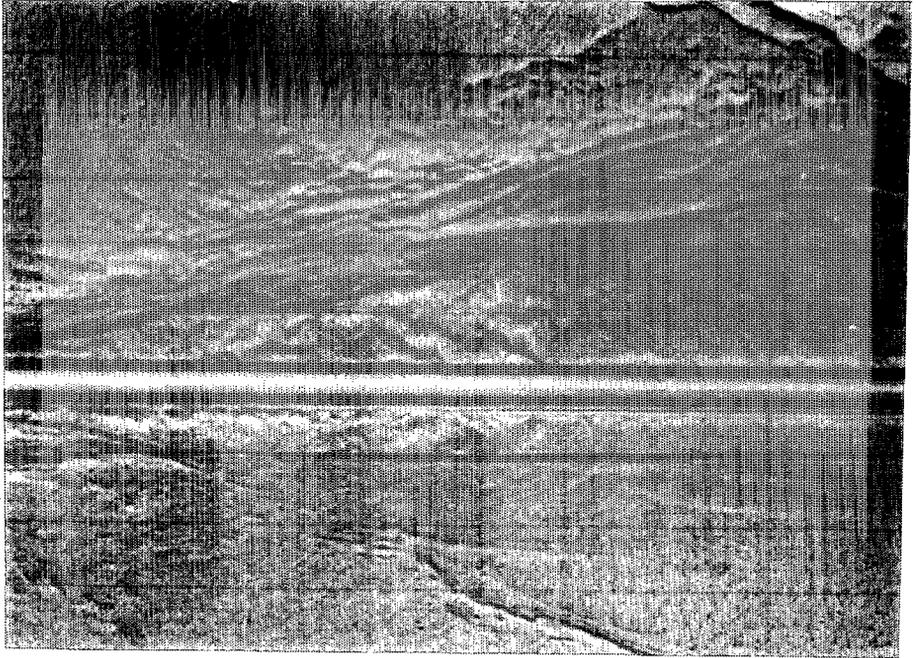


Figure 12 - Sillons sédimentaires enregistrés dans le lit du chenal principal à proximité de l'île de Cumbu et les formes érosives semblables à des dent de serre. Classe :100 m

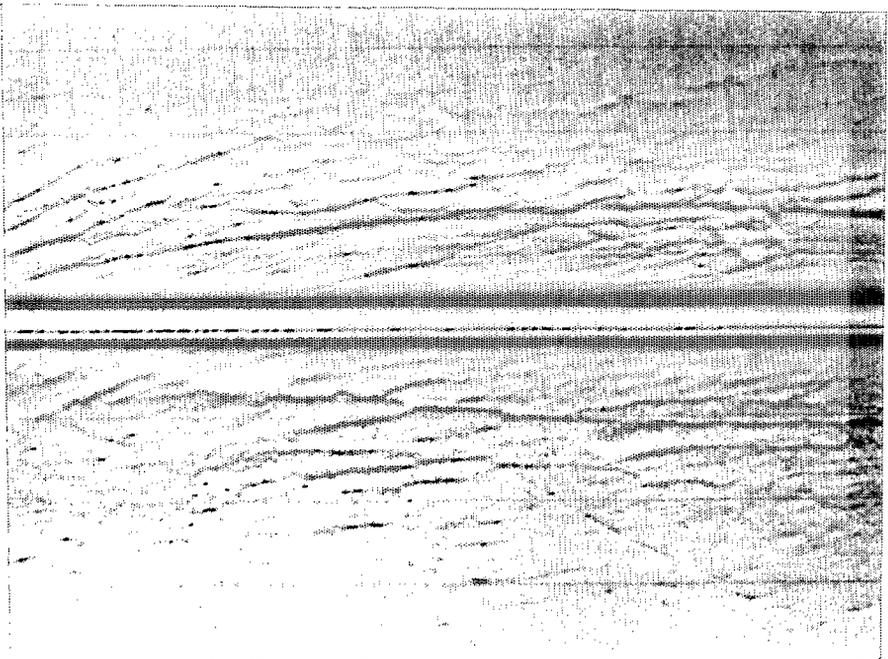


Figure 13 - Chenal Principal du Fleuve Guamá, à proximité de l'île de Cumbu Sillons sédimentaires déviés. Classe 100

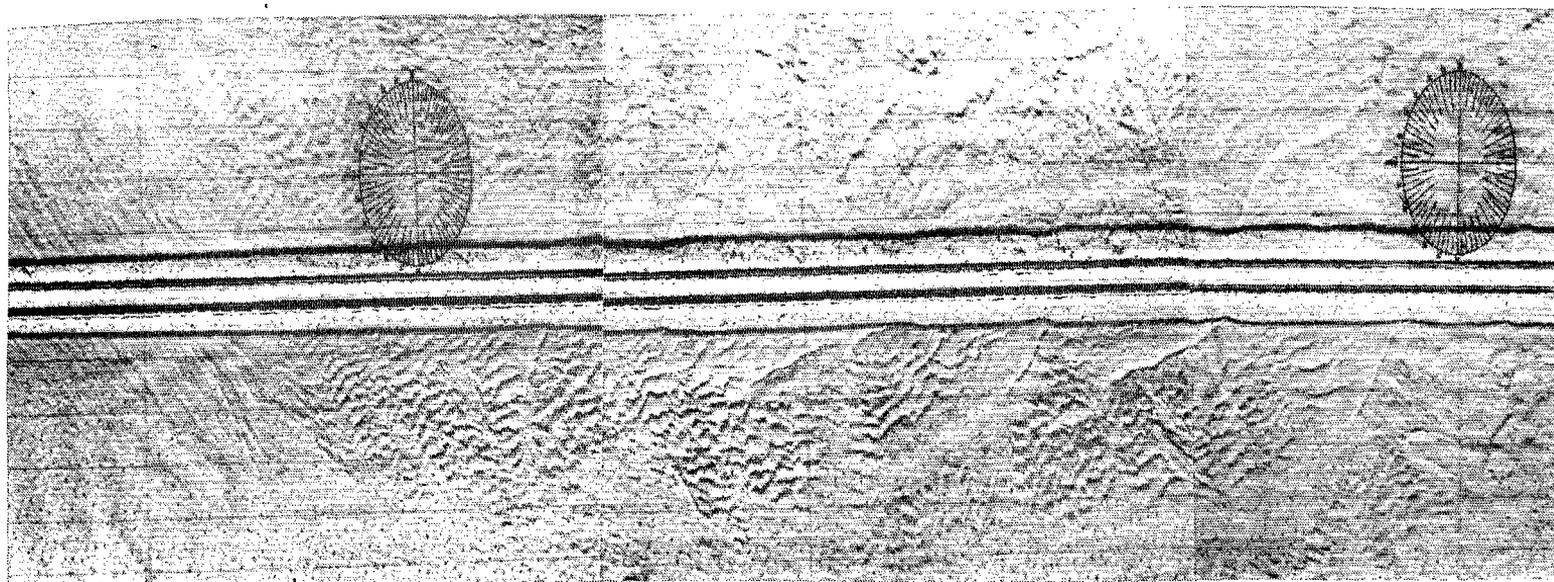


Figure 14 - Registre sonographique dans la zone des "Sand waves" localisée dans la partie Nord du chenal de l'île das Onças. La zone possède une extension de près de 400 m et une largeur de 185 m. La longueur de l'onde moyenne des "Sand waves" est de 90 m. Tandis que ceux dont les flancs sont sous le vent sont orientés vers l'embouchure du rio et leurs hauteurs varient de 0,65 à 1,35 m.

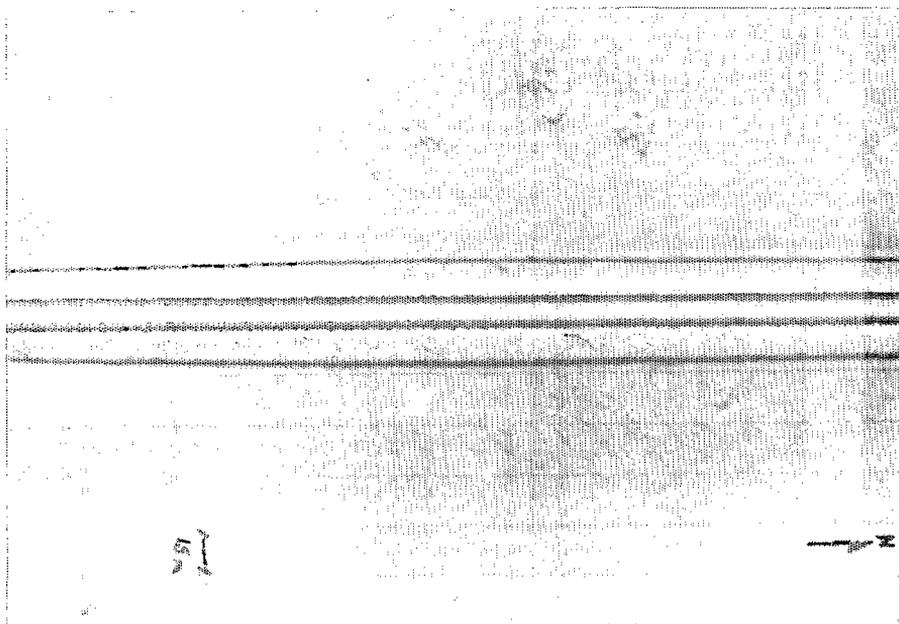


Figure 15 - Linéaments des courants associés à la zone de "Sand waves" dans le chenal de l'île das On cas . Série :100 m



Figure 16 - Lineament des courants représentés par les petits cordons et les dépressions dans le Chenal de l'île das Oncas. Série :100 m