

**Bocas de Ceniza ou l'aménagement de
l'embouchure du Río Magdalena.
Rodolfo Segovia Salas
Paris, le 19 février 1962**

**(Bocas de Ceniza o el manejo de la
desembocadura del Río Magdalena.
Rodolfo Segovia Salas
París, 19 de febrero de 1962)**

Etapas para el intento de una interpretación aproximada del documento “Bocas de Ceniza o el manejo de la desembocadura del Río Magdalena”, de Rodolfo Segovia, fechado en París, 1962.

1. El Dr. Rodolfo Segovia, de estudiante de doctorado en la Universidad de París, trabajó muy de cerca con los ingenieros del Laboratorio Central de Hidráulica de Francia (LCHF). Ellos acababan de regresar de varios años de trabajo de campo en Bocas de Ceniza y en el modelo de la desembocadura del río en una bodega de la Universidad Nacional de Colombia. El documento era el requisito final de su postgrado en la Universidad de París. Entregó a su profesor el original de su trabajo sobre Bocas de Ceniza y nunca más lo recuperó.
Lamentablemente dicho original se perdió porque el Dr. Segovia primero tuvo que viajar primero a Alemania y luego regresar a las carreras a Colombia. Le quedaba tan solo una copia a carbón de su gran trabajo “*Bocas de Ceniza o el manejo de la desembocadura del Río Magdalena*”, En esa época, una explicación para los jóvenes, las copias se hacían en “papel carbón” y tener una copia a carbón llena de vacíos era terrible porque se perdía el sentido de la frase.
Rodolfo Segovia nunca pudo recuperar el original. El Dr. Segovia conservó una copia a carbón con todos los defectos de las copias de esta defectuosa tecnología, felizmente superada en la era digital.
En un gran y largo artículo publicado en la revista CREDENCIAL y en otros medios a finales de los setenta, el Dr. Rodolfo Segovia demostró su profundo dominio del tema, que le serviría a Colombia cuando fue nombrado, después de estar tres años en la presidencia de ECOPETROL, como último ministro de Obras Públicas y Transporte del gobierno de Belisario Betancur.
2. En un generosísimo gesto de amistad muy, a mediados del año 2020, el Dr. Rodolfo Segovia, conociendo de mi deseo de investigar sobre Bocas de Ceniza (tan fascinante como el Dique), desenterró de una bodega de documentos viejos y me envió un PDF de dicha copia al carbón, en francés, con partes altamente técnicas escritas en el vocabulario científico de los ingenieros hidráulicos galos. El documento tenía secciones desaparecidas, otras poco legibles y una parte final manuscrita. Algunas medias páginas estaban tachadas con puntos rojos (ver documento adjunto).
3. Para descifrar el documento, contraté en Cartagena a una traductora, la Dra. Myriam Cabrales el 29 de diciembre de 2020, hizo ella un maravilloso trabajo de reconstrucción del original francés. Volvió legible lo ilegible, pero aun así, el documento seguía con grandes lagunas anotadas, otras tachadas y una parte final escrita a mano casi que ilegible. Además de estos defectos físicos, el aprendizaje de la terminología de la ingeniería hidráulica francesa seguía siendo retadora.
4. El 16 de diciembre de 2021, Nadim Arrieta López hizo una traducción del francés al español del trabajo en francés de Myriam Cabrales, utilizando el

programa Microsoft Word 365. Se hicieron correcciones menores posteriormente.

5. Presentamos la historia del documento de 1962 en la Academia de Historia de Cartagena, en una sesión de marzo de 2024.

Para preservar este trabajo de Rodolfo Segovia, entregaremos copia a carbón empastada del trabajo de Segovia sobre Bocas de Ceniza y entregar a la biblioteca Bartolomé Calvo del Banco de la República. Incluiremos el documento a máquina de escribir (trabajo académico entregado a la Universidad de París) cuyo original nunca pudo ser recuperado por su autor el doctor Rodolfo Segovia Salas.

6. El trabajo del Dr. Segovia, utilizando los datos del Laboratorio Central de Hidráulica de Francia (LCHF), es un ordenamiento notable de los datos recopilados y analizados por el LCHF, que logra, gracias a una lógica implacable, describir y ordenar todos los misterios hidráulicos de Bocas de Ceniza, recogidos durante sus años de investigación en París y con los modelos hidráulicos de Bocas de Ceniza en Maisons-Alfort y la Universidad Nacional.

La publicación del preciso y adecuado trabajo del Dr. Segovia en 1962 hubiera tenido mucho impacto en el desarrollo de las obras de Bocas de Ceniza durante el resto del siglo XX.

Copia al carbón entregada por el Dr. Rodolfo Segovia Salas.

Bocad de Ceniza ou l'aménagement
de l'embouchure du Rio Magdalena.

R. E. Segovia ✓
Paris, le 19 Febrier, 1962.

-I-
Caracteristiques générales du fleuve/

Longueur: 1532 kms dont approx. 1300 kms navigables.
Barranquilla-Magangué 4 mts tirant d'eau
Magangué-Honda (rapids a 947 kms.) 1.5 mts t. d'e.
(Le débit n'est pas insuf. pour la navedation
jusqu'avant Honda dans ce cours moyen qu'aux
basses eaux de Jan., Feb. et Mars grace aux
nombreuses lagunes qui servent de bassin de
régulation. Extension approx. 2200 kms² qui
se remplissent au moment des crues et se vident
aux basses eaux.). Au-dela de Honda navedation
a tirant variable selon la hauteur des eaux.

Affluents: 42 de plus au moins grande importance. 23 a la
rive gauche dont le Cauca le plus important a
322 kms de la mer (pas d'affluents import. apres) Pas d'aff.
et 19 a la rive droite. entre Yucal
et la mer.

Surface
du Bassin: 440.000 kms². Vallée entre les cord. Central et Oriental.

Pente: La source se trouve a 4.270 mts.
Source-Purificación. Régime torrentiel entre 2et 6/1000
Purificación-Rio Carare. Cours moyen. 2 a 0.4/1000.
R.Carare-mer. Cours bas. 0.39 et 0.04/1000.

Régime
des crues: Les crues suivent les pluies. Deuxx saisons pluv.:
Mai-Juillet (Max. Juillet)
Oct.-Décem. (Max. Nov. celle-ci étant la plus élevée).
Étiage: Mars-Avril.
Diff. des hauteurs entre basses et hautes eaux a:
Girardôt: 9 mts (11 mts. lors de tres fortes crues).
Dorada : 5-6 mts.
Calamar : 6 mts. (lors de tres fortes crues les
eaux se repandent dans la plaine).

Débit
(liquide): En 1956 (année considérée comme moyenne) 260.330.000 mts³/an.
L'apport du Cauca augmente le débit de 60 a 80% et
apres se poit le débit rest sensiblement le meme
jusqu'a la mer.

Géologie
Vallée : Effondrement tertiaire posterieur au soulèvement
de la Cord. Oriental. Couverte par le mer au Cretacé.
Plusiers transgressions, la dernière au Cret. Sup.
Après la retraite de la mer et le soulèvement de
la cote vallée constituée par des formations sé-
dimentaires (gres, poudingues, sédiments volcaniques,
et gravats d'origine glaciére).

~~Rarrxxx~~

Géologie

Partie

A partir de Calamar:

Maritime: Rive Gauche. Roche sédimentaire d'origine marine (Eocene).

Le Canal del Dique n'était probablement qu'un ancien bras de l'embouchure (delta), l'actuel dept. del Atlántico n'étant qu'une île rattachée au continent par les dépôts du fleuve. Les dunes anciennes et Cienegas dans le bassin du ~~fleuve~~ Canal renforcent cette idée. Le Canal del Dique rélie Cartagena avec la Magdalena a tendance à se combler à chaque crue et l'on doit y maintenir une drague.

Rive Droite. Plateau de formation deltaïque. Bras morts qui débouchent dans de Cienegas dont la plus importante, Cienega Grande, formée probablement partie de l'ancien estuaire et se trouve aujourd'hui séparée de la mer par un étroit cordon de sable. Las Bocas del Rio Viejo, à l'extrémité Est de ce cordon de sable, était probablement, il y a plus de deux siècles, le débouché sur la mer du bras principal du fleuve. Aujourd'hui l'accès par cette Boca est presque impossible mais le canal B/quilla - Cienega réjoint une partie de cet ancien bras.

Entre le fleuve et la Cienega Grande la forêt est inondée. Marécage absorbant une partie non négligeable des eaux du fleuve. Cependant, ces pertes semblent être compensées par des apports locaux car le débit à B/quilla est sensiblement égal à celui à Calamar.

Le lit de
B/quilla:
à la mer

Longueur du lit entre les lignes de niveau -6mts: 700 mts. et varie peu (il y a une section plus étroite peu en aval de Las Flores: 640 mts).

Section Mouillée (B/quilla-mer): 7000 mts² et varie peu.

Lit Mineur. Terminal-km.4: Rive Gauche
Km 4- km 8 : " Droite
Km 8- Embouch: " Gauche (le chenal dans la rive droite ayant aussi une certaine importance).

Fond: Probablement rocheux. Coral le long les quais du terminal. Mais le lit est dans l'ensemble sableux et très irrégulier. Nombreux rides sur la surface du lit, quelques uns étant des dunes de plusieurs mts. d'hauteur. Plus en amont, dans le cours moyen, apparaissent au moment des basses eaux des énormes bancs de sable qui changent de forme continuellement; ce sont eux qui alimentent le charriage à l'embouchure (et constituent un formidable obstacle à la navigation).

de Sabanilla, liaison entre B/quilla et la mer.
 Evolution favorable: A partir de 1850 la barre de Bocas se creuse
 Bocas de ~~Cartagena~~ Cartagena, révèle la navigation.

Accès au

fleuve : L'accès de la mer par les Bocas a été toujours une difficulté. Pendant l'époque colonial, le Magdalena constituait la seule voie vers l'intérieur du pays (ceci est d'ailleurs toujours vrai), mais le commerce avec la métropole se faisait pas par B/quilla, petite village alors sans importance, mais par Cartagena, baie d'eau profonde et point d'arrêt des convois. De Cartagena au fleuve, voyageurs et marchandises prenaient le Canal del Dique déjà utilisé au XVII^e siècle et objet d'aménagements au ~~XXIX^e~~ XVIII^e. Cette voie n'a été d'ailleurs jamais complètement abandonnée. D'importants travaux de dragage furent entrepris entre 1923 et 1929 et continuent aujourd'hui, mais les résultats ont été plutôt décevants. En outre, un chemin de fer relia Cartagena avec Calamar en 1894.

Carte

Mosquera: Une carte datant de 1849 montre qu'à cette époque l'embouchure du Magdalena occupée ~~déjà~~ ^{par le port} une position ~~très~~ voisine de l'actuel. A l'ouest de Las Bocas se trouvaient une série d'îles qui encombraient l'embouchure mais qui protégeaient le petit port de Sabanilla, liaison entre B/quilla et la mer.

Evolution

favorable: A partir de 1850 la barre de Bocas se creuse permettant la navigation jusqu'à B/quilla à des bateaux de 7,50 tirant d'eau. Le tonnage annuel atteint 23.000 en moyenne. Cependant, en 1884 le trafic est de nouveau interrompu à cause des accidents. La barre se reforme, et en 1884 il n'y a plus que 4-5 mts. (13-14') de fond. Sabanilla redevient le port, relié à B/quilla par un chemin de fer.

Puerto

Colombia: Quelques années plus tard, les îles à l'ouest de l'embouchure disparaissent formant au lieu une longue fleche de sable qui culminait dans ~~xxxxxxx~~ l'islot ~~de~~ Verde (Nord de Punta Hermosa). A l'ombre de cet islot, Puerto Colombia, à quelques kms. à l'ouest de Sabanilla, devient le port doté d'un grand quai d'accostage modernement équipé et relié lui aussi à B/quilla par un chemin de fer.

Premières
études

: Au début de ce siècle, B/quilla obtient son indépendance politique de C/gena avec la création du Dpt. del Atlántico dont elle est la capitale. L'agitation en faveur de la canalisation des Bocas prend corps et la pression politique donne naissance aux premières études:

1907. Lewis Haupt. Les sables de la barre ont un origine maritime venant de l'est.

1914. Julius Berger. Levé général du fleuve et consultation sur les Bocas. Confirmation de l'ex-

istance d'une courant maritime venant de l'est. 1920. Black, McKenney & Steward. Projet comportant deux jetées parallèles perpendiculaires à la courant du littoral. La distance entre les ouvrages correspondrait au rayon hydraulique théorique pour un débit maximum et une profondeur de 30' (700 mts.). Mais pour éviter accidents (surtout lors de fortes crues), on adopta un rayon de 877,6 mts., covenant de le reduire encore (par épis) si la distance choisie se révélée insuffisante.

Iniciation

des travaux: 1924-1930. Ulan & Co.

1934. Reprise des travaux par la Winston Co.

Travaux de la Winston

:Digue Boyacá. (Flores au Cap Augusta). Il avait par objet: a) Isoler le lit du fleuve des "cienegas" de Mallorquia y Cantagallo qui absorvaient une partie non-négligeable du débit du fleuve; et b) Protéger la rive gauche contre la forte érosion causée par les courants et la courbure du fleuve. Construction. Pierre de carrière déposée en profil trapézoïdal, voie ferrée, et 4 épis entre le kms. 2 et 6 comme protection contre l'érosion.

Tajamar (brise-lames) Occidental. Prolongation du Digue Boyacá et dans la même direction que celui-ci (347°). Il comporte une ossature en pieux de bois et d'un enrochement calcaire mis en place (forme aussi trapezoïdale) par déferlement. La voie ferrée du Digue est elle aussi prolongée sur le Tajamar. 1.600 mts construits entre ~~Sept et~~ Avril et Sept. 1934.

Tajamar Oriental. Prolongeant lui aussi une digue similaire à celle de la rive gauche (Noter ~~xxxxx~~ cependant, que cette digue et sa voie ferrée ne suivent pas une ligne ~~xxxxx~~ droite, mais la rive de la Cienega de la Punta Faro). 800 construits entre Jan. et June 1935.

Chenal

; En jan. 1935 la barre se creuse donnant lieu à un petit chenal de 10 mts étroit et irrégulier.

Effondrement

de la barre:

Le 29 aout, 1935 430 mts. du Tajamar Occidental s'effondrent et la barre de Bocas n'existait plus. La formation d'un chenal de 30 mts. de profondeur suivit la disparition de quelques 30 millions de tonnes de sable entraînées vers le large. L'avalanche endommagea le cable sous-marin Pto-Colombia-Maracaibo, 30 kms au large.

Le 7 Déc, 1935, 54 mts. du tajamar disparaient encore. En tout cas le problème de Bocas de Ceniza semble résolu, et B/quilla assurée d'un accès direct à la mer. Mais....

Reconsti-

tution de: A partir de 1940-1941 la barre commence à s'étendre et les fonds diminuent. On consulte: Bent, qui après une courte reconnaissance des Bocas proposa en mars 1945 une contraction de l'embouchure

Bocas de Ceniza et la ville de B/quilla. Le milieu humain.
 Le passé: "Le Rio Magdalena est historiquement la première
 et la plus belle des voies des Colombiens",
 et B/quilla doit son essor à cette vérité géo-
 graphique. On ne connaît même la date exacte de
 la fondation de la ville; le début du XVIII^e est
 probablement une bonne approximation. Pendant
 toute l'époque coloniale B/quilla resta sous l'ombre
 de Santa Marta et surtout de C/gena, ports qui
 dominaient la côte atlantique colombienne. La
 vraie poussée de la ville ne commence qu'en 1823
 avec l'introduction des bateaux à vapeur dans le
 fleuve; lentement elle déplace ses rivales. Cette
 tendance s'accentue encore avec l'évolution favorable
 de las Bocas et avec l'expansion du commerce
 international. La création du Dptm. del Atlántico
 ne fait que confirmer cette situation de fait.
 Cependant, en 1910, B/quilla n'a que 30.000 hab..
 50 ans plus tard la ville compte 300.000 hab..
 La croissance accélérée date de l'effondrement
 de la barre en 1935 qui fit de Bocas de Ceniza en
 prolongement de la B/quilla dans la mer. Aujourd'hui,
 grâce à l'industrie, l'activité économique de la ville
 dépasse de loin l'activité du port, mais
 le port, quoiqu'il en soit, continue
 toujours à être la clef de l'expansion et la prospérité
 du gouvernement colombien.

Segond et B/quilla doit son essor à cette vérité géo-
 graphique. On ne connaît même la date exacte de
 la fondation de la ville; le début du XVIII^e est
 probablement une bonne approximation. Pendant
 toute l'époque coloniale B/quilla resta sous l'ombre
 de Santa Marta et surtout de C/gena, ports qui
 dominaient la côte atlantique colombienne. La
 vraie poussée de la ville ne commence qu'en 1823
 avec l'introduction des bateaux à vapeur dans le
 fleuve; lentement elle déplace ses rivales. Cette
 tendance s'accentue encore avec l'évolution favorable
 de las Bocas et avec l'expansion du commerce
 international. La création du Dptm. del Atlántico
 ne fait que confirmer cette situation de fait.
 Cependant, en 1910, B/quilla n'a que 30.000 hab..
 50 ans plus tard la ville compte 300.000 hab..
 La croissance accélérée date de l'effondrement
 de la barre en 1935 qui fit de Bocas de Ceniza en
 prolongement de la B/quilla dans la mer. Aujourd'hui,
 grâce à l'industrie, l'activité économique de la ville
 dépasse de loin l'activité du port, mais
 le port, quoiqu'il en soit, continue
 toujours à être la clef de l'expansion et la prospérité
 du gouvernement colombien.

Interven-
 tion du
 L.C.H.F.

- III -

Bocas de Ceniza et la ville de B/quilla. Le milieu humain.

Le passé: "Le Rio Magdalena est historiquement la première
 et la plus belle des voies des Colombiens",
 et B/quilla doit son essor à cette vérité géo-
 graphique. On ne connaît même la date exacte de
 la fondation de la ville; le début du XVIII^e est
 probablement une bonne approximation. Pendant
 toute l'époque coloniale B/quilla resta sous l'ombre
 de Santa Marta et surtout de C/gena, ports qui
 dominaient la côte atlantique colombienne. La
 vraie poussée de la ville ne commence qu'en 1823
 avec l'introduction des bateaux à vapeur dans le
 fleuve; lentement elle déplace ses rivales. Cette
 tendance s'accentue encore avec l'évolution favorable
 de las Bocas et avec l'expansion du commerce
 international. La création du Dptm. del Atlántico
 ne fait que confirmer cette situation de fait.
 Cependant, en 1910, B/quilla n'a que 30.000 hab..
 50 ans plus tard la ville compte 300.000 hab..
 La croissance accélérée date de l'effondrement
 de la barre en 1935 qui fit de Bocas de Ceniza en
 prolongement de la B/quilla dans la mer. Aujourd'hui,
 grâce à l'industrie, l'activité économique de la ville
 dépasse de loin l'activité du port, mais
 le port, quoiqu'il en soit, continue
 toujours à être la clef de l'expansion et la prospérité
 du gouvernement colombien.

Le future: Or, pour la première fois dans ce siècle, le port de B/quilla va se trouver en face d'un concurrent sérieux. Le Ferrocarril del Magdalena reliant Bogotá avec Sta. Marta vient d'être achevé. Le fleuve perd son monopole de 4 siècles. Entre 1950 et 1952 le trafic dans le fleuve représentait 24% du ton/kil. transporté dans le pays; depuis lors par la seule concurrence de la route et du port de Buenaventura (Pacifique) le % a diminué. Selon les prédictions, le chemin de fer enlèvera au fleuve 20-30% du trafic dans le cours inférieur et 80% dans le cours moyen. Etant donné que la navigation dans le cours moyen est constituée dans sa plus grande partie par la liaison de B/quilla avec les grands centres de consommation à l'intérieur du pays, le second chiffre pourrait être catastrophique. Pour faire face à cette menace les compagnies de navigation poussent l'aménagement du fleuve et la modernisation des ports; avec une rationalisation du transport, le fleuve restera, au moins pour certains types de marchandise, l'acheminement le plus économique.

D'autre part, une branche reliant B/quilla au Ferr. del Mag. est en voie de construction. Tout le trafic ne sera donc pas détourné vers Sta. Marta, surtout que B/quilla a ~~xxxx~~ sa faveur le poids de la population: 500.000 contre 50.000 pour Sta. Marta. Mais le port, dans les conditions présentes, est condamné. L'avenir de la ville dépend de la maîtrise de Bocas de Ceniza, de la solution définitive du problème. Voici donc le résumé des études faites par le L.C.H.F. pour mettre le milieu naturel au service d'une ville, et d'un pays.

La Nature de l'Embouchure.

- IV -

L'étude des conditions à l'embouchure du Rio Magdalena conduit à la réponse d'une question, capitale du point de vue pratique: Pourquoi se forme-t-elle, la barre? Les recherches Océanographiques, Hydrographiques et sédimentologiques ~~xxxxxxxxxxxx~~ nous donnent l'origine de la barre et constituent le préambule à ~~xxxxxxxxxxxx~~ la réponse d'une seconde question encore plus importante: Quoi faire pour s'en débarrasser? Cette seconde démarche nous la examinerons plus tard, si le temps nous le permet, suivant les méthodes en modèle réduit utilisés par le L.C.H.F..

Régime des marées.

Faibles
dans la:
région

Elles sont de faible amplitude à Bocas, dépassant rarement 0,50 mts. Elles ne semblent pas engendrer des courants le long de la côte.

Dans des conditions exceptionnelles une très faible onde se fait sentir à Calamar, 90 kms. en amont.

Pas de re-

verse des: Il n'y a pas de reverse des courants, mais simple-
courants ment surélévation du volume d'eau stocké à l'embouchure.
Par fois on a constaté une reverse de courant dans
le fond (teneur de NaCl à B/quilla supérieur au nor-
mal), mais le phénomène est rare.

Amorti-

ssement:

Aux hautes eaux l'amortissement est de l'ordre de
30%; la marée montante se traduit simplement par
un ralentissement du courant.

L'énergie de la marée reste dans tous les cas
faible par rapport à celle du fleuve (4-15% dépendant
en le débit). "Inutile de spéculer sur son utilis-
tion pour modifier, dans le sens cherché, le régime
de l'embouchure.

Régime des courants marins.

Permanents C.M. permanents, s'étendant à des grandes masses
d'eau et observables loins des côtes, p.e. Gulf Stream,
il n'y a pas au larges de Bocas susceptibles d'in-
fluencer sur le régime de l'embouchure.

Dus à la
marée

Narées. Presque pas comme déjà vu. C.a.d. il n'y
a pas de grands déplacements de masses d'eau qui
changent de sens--c'est xxx leur caractère spéci-
fique--lors de reversements.

a la houle

Houle. Courants dus à l'expansion latérale de la
houle entre la zone de déferlement et l'estran et
dont la force xxxxx est fonction de l'énergie de
la houle et de l'angle des crêtes par rapport au
rivage. (Voir régime des houles)

Au vent

Vents. Courants de surface qui peuvent donner
naissance à des courants de compensation dans le
fond engendrés lorsque le vent souffle dans une
direction donnée assez longtemps. (Voir régime des Vents).

Régime des houles.

Houle do-
minante:

Direction. Venant du NNE-NE

Période. 5 à 8 secondes (Max.)

Amplitude. 3 mts. (sur la barre).

Il y a aussi par fois une houle venant du E ou NE,
moins cambrée et dont l'amplitude est approx. 10 mts.

Pénétra-
tion

Toutes pénètrent le fleuve, la distance étant fonction
du débit du fleuve en ce moment, normalement jusqu'à
la presque-île Punta Caímán.

Courants: L'étude de la propagation de la houle depuis le large
jusqu'à la côte permet de concevoir la répartition
de l'énergie et prévoir l'apparition des courants.
Est. Il y a presque pas de courants de houle à
l'est de l'embouchure, ou très faibles dans la di-
rection est-ouest, sauf pour la houle qui aborde
à le Tajamar Oriental à une incidence inverse de la

precedente et qui peut donner lieu a des courants
NS au voisinage de l'ouvrage.

Quest. Ici, par contre, l'incidence de la houle dominante est très forte ~~xxxxx~~ engendrant de courants de houle non-négligeables.

Dissymé-: Pour la bouée N ou SO l'incidence est évidemment
trie is- différente; à l'ouest pas de courants, tandis que
portante à l'est par la forme de la plage, le courant engendré
aura toujours une direction SO, mais encore moins
forte.

Régime des Vents

Vents dominants : Direction. Venant du NE-NNE.

Courants: Ils peuvent engendrer des courants de surface avec leur courants de compensation correspondants au fond.

Appart de Ils jouent donc en role dans l'évolution des stocks
sableux, notamment a l'est de Bocas. Mais il serait
faux de penser que le vent est une des causes principales
de l'ensablement de l'embouchure. Selon cette
théorie émise pour la première fois par Haupt, le
vent entrenerait des sables des estrans secs (dunes
a l'est de Bocas) dans le fleuve ou sur la barre.
Il voyait la preuve et autres apres lui dans le
fait que le Taj. Cr. et sa voie ferrée s'ensablent
par fois. En réalité, comme nous verons plus tard,
les apports du vent sont négligeables par rapport
aux autres rapports; de l'ordre de ~~xxxxxxx~~
~~xxx~~ 0,1 mill. mt.³/an contre plus de 100 mill. mt.³/an.
Il y aurait néanmoins, intérêt a fixer les dunes a
l'est par une végétation appropriée.

Port et hauteur d'eau dans le Rio Magdalena

La hauteur des débits et hauteurs d'eau suivent le régime de
varie li- pluies déjà décrit. A Calamar on a enregistré:
néaire- max. 12000 mt³/s, min. 2000 mt³/sec.. La hauteur
ment avec d'eau varie linéairement avec le débit (au moins
le débit dans la partie maritime). La variation des niveaux
d'eau a le même allure a B/ouilla et a Calamar
(encore une preuve de la faiblesse de la marée).
Une variation de 1000 mt³ a 8000 mt³/s correspond
app. a 1 mt. de hauteur. D

Au large D'autre part, au large, le niveau est indépendant du débit et les variations ne sont pas dues qu'à la marée. Celle-ci étant faible, le niveau moyen au large est à peu près constant.

Pentes Hydrauliques et Rugosité des fonds

Dans la partie maritime la pentex hyd. est une fonction directe du débit. A Calamar elle passe de 0,64/1000 aux hautes eaux à 0,4/1000 aux basses eaux et des différences semblables subsistent jusqu'à la barre même.

La perte d'énergie due à la rugosité des fonds n'est pas très grande à Bocas et elle indépendante du débit.

Réupera-

tion d'é-: Les dissipations d'énergie à Bocas de Ceniza ne sont pas excessives; le calibrage de l'embouchure ne permettrait en récupérer beaucoup; s'il est fait, il faut qu'il soit conçu rationnellement pour modifier le moins possible le régime assez satisfaisant du point de vue énergétique.

Débits solides fluviaux

Motivations: Le débit solide se compose du a) Débit solide en suspension, b) Débit solide entraîné par saltation et par roulement.

Suspension: Débit solide en suspension. La teneur en matières solides en suspension croît avec la vitesse et la turbulence, c.à.d. au moment des crues. D'une manière générale: $T_b = \text{Débit sol. sus.} / \text{Débit du fleuve} = Q_s / Q_e$. Celle-ci est une loi statistique générale limitée par des écarts parfois considérables. La principale déviation de la nature variable des matériaux en suspension. Or, ces matériaux se modifient à mesure que les eaux montent car les premières pluies enlèvent d'abord les argiles et les éléments fins. Pour le Magdalena, p. ex., on trouve en Oct. un grand % d'éléments fins. Plus tard, le % de sable augmente tandis que la concentration des matériaux en suspension diminue; l'augmentation du débit ne compense pas avec une turbulence accrue, les pertes en suspension dues aux sables plus lourds.

Saltation: Débit solide par saltation et roulement. Ce charriage, et roulement limité à une épaisseur de 0,20 mts au-dessus du lit, se situe entre 10-20% du débit en suspension, le rapport n'étant pas constant car ils ne dépendent pas des mêmes variables; le débit en suspension tend à diminuer à partir d'un certain niveau d'eaux, tandis que les transports sur le fond (roulés ou entraînés par saltation) continuent à croître avec le débit.

Débit so-

lides total: Par des déductions théoriques on arrive à: pour un dé-125.000.000 m³/an. Ce chiffre correspond de très près à la réalité; en 1947 le débit solide mesuré de moyen fut de 120.000.000 m³ pour un débit liquide de 6000 m³/s. 6000 m³ considéré comme moyen. Un tel transport correspondrait à une colonne de 100 mts de hauteur s'il était déposé sur un km² de cote.

Nature du

débit sol: La partie la plus fine est un poudre contenant des débris de mica et quartz dont le diamètre est inférieur à 0,04 mm. Ce sont semble-t-il des précipités qui se déposent même avant flocculation (phénomène lié à la présence d'ions marins bivalents).

Courant du fleuve; expansion des eaux; champs de vitesses.

expansion: A l'embouchure le fleuve s'étend symétriquement de part et d'autre au large de Bocas. Les eaux du fleuve restent localisées assez près de la surface; une couche d'eaux fluviatile se glisse sur une base d'eau de la mer, deux phases bien différentes, visibles 15 ou 20 kms. au large et 60 lors des crues.

L'expansion vers l'est ~~max~~ n'est que de quelques kms. (5), mais vers l'ouest, elle est presque illimitée.

Décentration

a l'est: Il est possible qu'à l'est les eaux du fleuve, jusqu'à 5 kms., se décentrent donnant naissance à un banc de sables fins qui entraînés par la houle peuvent revenir pour former une petite fraction des sédiments de la barre. En fait, il y a à l'est des courants de houle s'étendant de la zone de déferlement jusqu'à l'estran, et même des courants d'une faible intensité (0,5 mts/s.) entre le phare Gómez et l'embouchure (sauf au bord même du Taj. Or, ou le courant est renversé).

Sédimentologie.

Analyses

granulimétrie: a) La partie Ouest de la barre présente une granulimétrie relativement grossière dont l'unique source possible paraît être le fleuve.

Conclusions.

- b) La barre ne peut pas être alimentée par des sédiments venant de l'ouest, au contraire, il y a transfert de sable de la barre vers l'ouest.
- c) Les dépôts situés à l'est ont une granulimétrie plus fine; ils peuvent--a priori--être alimentés de l'ouest ou de l'est.
- d) Devant le phare Gómez, le stock existant ne peut pas être rattaché par évolution à celui de la barre.
: La barre est alimentée par le fleuve sans exclure complètement la possibilité des faibles apports orientaux sur son flanc est.

Minéraux

lourds, : a) La quasi totalité des matériaux qui assurent l'alimentation de la barre sont d'origine fluviatile.

Conclusions

- b) L'évolution actuelle des dépôts situés à l'est de Bocas consiste en un remaniement du stock existant qui ne peut ~~être~~ être alimenté que dans des proportions infimes par des matériaux venant de l'est.
- c) L'influence des facteurs océanographiques sur le flanc est de la barre ne peut-être pas négligeable en ce qui concerne le classement et composition ~~des~~ granulométrique des éléments mais il s'agit certainement d'un remaniement dans le profil et pas d'un transfert littoral des matériaux.

...va... le... le...
 ...semble être le témoin d'un ancien bras du
 fleuve; l'autre, devant la Boca del Rio Viejo, est
 sans doute une ancienne barre d'embouchure dont le
 Cette action est donc négligeable sur la formation
 de la barre.

Morphologie du littoral.

Plateforme: Dans cette région aux environs de Bocas, la plat.
 continental continental a une pente très forte qui atteint et
 dépasse 5%.

Est. A la hauteur de Sta. Marta le isobathe -1000 se
 trouve a 12 kms. de la cote, et l'isobathe -500 a
 2 kms. et a l'est de l'embouchure ces deux distan-
 ces sont plus au moins gardées. En face de Bocas
 l'isobathe -1000 est a 18 kms et -200 mts sont atteints
 a 5 kms des tamaras. L'étroitesse de la plata-
 forme continental est a remarquer.

Le cote: La cote même n'offre aucune singularité. Entre
 Sta. Marta et Cienega elle est dominée par des hautes
 falaises, flanquée de la Sierra Nevada. Un long
 cordon relie Cienega a Bocas, l'île Salamanca qui
 semble avoir été modelé par des boules frontales.

**Morpho-
 gie subma-
 rine** On constate la présence de deux déformations des
 lignes de niveau: l'une, en face de la Boca de Cie-Orientatio-
 nega, semble être le témoin d'un ancien bras du RNO
 fleuve; l'autre, devant la Boca del Rio Viejo, est
 sans doute une ancienne barre d'embouchure dont le RNE
 plateau supérieur a été arrasé a -11 mts. Ce sont
 deux talus d'alluvions dont le second, de formation
 plus récente, est le plus petit. Tous les deux sont
 stables.

**Ouest. Mor-
 phologie :** A l'ouest, le m.s. est totalement différent. A
 submarine l'estran, la bathymétrie zéro est hachée (festons)
 dessinant des nombreuses petites fleches de sable
 caractéristiques d'un transit littoral considérable
 vers l'ouest. Il y a trois déformations importantes:
 une émergente, l'île Verde devant Puerto Colombia,
 épine dorsale du système; un énorme banc de sable,
 Bajío Zamba, entre Punta Caleras y et Punta Piedras;
 et un dernier banc, Banco de Playa Grande, au large
 de Cienega. Tous les trois sont instables, et sauf
 peut-être, le dernier, issus des sables du fleuve,
 alluvions du R.N. en migration le long du continent
 (gigantesques "ripple marks"). Ils se trouvent entre
 le lignes de -10 et entre -20 mts.

Il est a remarquer que les plages tant a Sta.
 Marta comme a Cienega sont constitués par des sables
 grisâtres d'origine fluviale, d'où le nom de Bocas de
 Ceniza.

La cote: A l'ouest de Bocas se trouve d'abord un cordon
 de 9 kms reliant l'embouchure a Sabanilla derrière
 lequel des lagunes ~~xxxxxxx~~ protègent aujourd'hui
 les anciennes falaises d'érosion situées a la Playa.
 Sabanilla est une tête de plateau calcaire et debout
~~xxxxxxxxxxxxxxxx~~ d'un trait de cote très instable
 culminant vers le très instable île Verde.

Est : modifications récentes du trait de la cote. Sans importance. Le banc du Río Viejo n'a pas bougé depuis 1935. Il ne semble pas avoir de transports solides par le grands fonds ou fonds moyens. Il y a à l'ouest du banc un canyon s'étendant jusqu'à la bathymétrique -5 qui aurait été rempli si les sables se cheminaient parallèlement au rivage. Les transferts de Sta. Marta vers le Bocas sont limités à la zone entre 0 et -5, donc certainement faibles.

Canyon du banc du Río Viejo : A l'ouest par contre, colmatage des fonds dont la disparition de l'île Verde n'est qu'un exemple. La ou en 1936 on trouvait 10 mts il y a aujourd'hui 12 ou 13, 20 mts 30 à 60, 100 mts 150. Ces chiffres sinon exacts sont au moins qualitativement valables.

Isle Verde : Réformation de la pla-ge. Après cette catastrophe, à Salgar une plage s'est formée qui progresse rapidement; 100 mts de largeur entre Oct. et Déc. 1955x. A C/gena il y a stabilisation, et à Puerto Colombia une nouvelle fleche se forme, plus près de la cote à l'extrémité de l'ancien quai. Il est évident que la rapidité de formation des plages ne peut s'expliquer que si l'on admet l'existence devant cette cote des énormes stocks de matériaux qui ne se fixent que temporairement.

Réformation

de la pla-ge. Après cette catastrophe, à Salgar une plage s'est formée qui progresse rapidement; 100 mts de largeur entre Oct. et Déc. 1955x. A C/gena il y a stabilisation, et à Puerto Colombia une nouvelle fleche se forme, plus près de la cote à l'extrémité de l'ancien quai.

Il est évident que la rapidité de formation des plages ne peut s'expliquer que si l'on admet l'existence devant cette cote des énormes stocks de matériaux qui ne se fixent que temporairement.

Evolution des fonds (de part et d'autre de l'embouchure sans l'évolution de la barre elle-même).

Est : Presque stables. Le banc du Río Viejo n'a pas bougé depuis 1935. Il ne semble pas avoir de transports solides par le grands fonds ou fonds moyens. Il y a à l'ouest du banc un canyon s'étendant jusqu'à la bathymétrique -5 qui aurait été rempli si les sables se cheminaient parallèlement au rivage. Les transferts de Sta. Marta vers le Bocas sont limités à la zone entre 0 et -5, donc certainement faibles.

Canyon du banc du Río Viejo : A l'ouest par contre, colmatage des fonds dont la disparition de l'île Verde n'est qu'un exemple. La ou en 1936 on trouvait 10 mts il y a aujourd'hui 12 ou 13, 20 mts 30 à 60, 100 mts 150. Ces chiffres sinon exacts sont au moins qualitativement valables.

Isle Verde : Réformation de la pla-ge. Après cette catastrophe, à Salgar une plage s'est formée qui progresse rapidement; 100 mts de largeur entre Oct. et Déc. 1955x. A C/gena il y a stabilisation, et à Puerto Colombia une nouvelle fleche se forme, plus près de la cote à l'extrémité de l'ancien quai. Il est évident que la rapidité de formation des plages ne peut s'expliquer que si l'on admet l'existence devant cette cote des énormes stocks de matériaux qui ne se fixent que temporairement.

Reculé du D'autre part, il y a eu aussi en recule du
cordon la-cordon lagunaire qui, devant la Páaya, avait été
gunaire. formé par le depot d'aluvions du fleuve. Depuis
1936 la cote a reculé 1400 mts. pres du Tajamar Occi-
dental xx(max. 1700). C.a.d., a 2000 mts a l'ouest
des ouvrages la plage a perdue approx. 400000 mts³
de sable par an et par km². Elle n'est aujourd'hui
que faiblement alimentée; 400000 mts³ serait donc
l'apport necessaire pour maintenir l'équilibre,
apport qui été meme dépassé avant la construction
des ouvrages.

Interpre-: Les phénomènes de transfert semblent se limiter
tation. a l'est a un remaniement de la stock sableux exis-
tent dont les modifications xx se font surtout et
Est. faiblement sur le profil. La cote est tres faible-
ment alimentée et presente un état sensiblement proche
de la stabilité. Seule la partie proche aux ouvrages
accuse un engraissement.

Ouest. A l'ouest par contre, les transferts littoraux
parallels a la cote sont tres intenses, le Rio Mag-
dalena constituant une source d'apports tres impor-
tante. En fait, l'équilibre dynamique de la cote
a été modifié:

Plateau a) Depuis deux cent années par le fait que le delta
continental. ~~submarin~~ sousmarin du fleuve a atteint la limite
du plateau continental (tres étroit a cet endroit),
avec une diminution des apports d'aluvions vers
l'ouest par le versement de ceux-ci dans le grands
fonds.

Diminutionb) Depuis 30 années par la construction des ouvrages
brutal des qui a provoqué, action de la canalisation, le re-
apports du jet des aluvions vers les grands fonds. Ces
fleuve. aluvions ne sont plus "disponibles" pour la cote
ouest que par l'effet du griff; seule la partie
superieur de la barre peut étre reprise par l'action
de la houle et assurer l'alimentation de la plage.
Il est en tout cas faut de postuler que ~~l'amaigrissement~~
l'amaigrissement des fonds a l'ouest est du aux fait
que le tajareros par leur face est (dans "dans le vent")
ont arrêté le cheminement du sable vers l'ouest.

Les consequences de cette ~~rupture~~ rupture de l'équi-
libre dynamique expliquent les modifications du trait
de la cote, ~~et~~ et les effondrement successifs des
matériaux déposés (Effondrement de la barre a deux
reprises). Il y a eu formation, probablement sous
l'effet de courants sousmarins de densité, etc., des
Canyons canyons importants dans le delta sousmarin. L'érosion
dans le delta sous atteint meme jusqu'a l'isobathe -20; ce ne peut étre
marin donc étre la houle, mais des glissements du plateau
deltaïque.

La situation du vu hydraulique la situation en 1935 était très mauvaise: deux canaux collés aux rives et séparés par un banc central. La situation a beaucoup évolué depuis.

Evolution des fonds du débouché de la barre

Evolution: Vers l'aval, de la barre à la section 1, la forme de la section varie peu. Le canal reste à peu près la même largeur. La largeur totale reste quasiment constante (ou presque) aux environs de 6500 mts. (4)

Vers la 4-6 (à la base du Taj. V.). La même allure générale de la section antérieure. Variations importantes de la largeur (valeurs moyennes: 7000 mts). (3)

Après la section 1 de la rive droite. Formation vers 1950 d'un nouveau canal contre la rive droite. (2)

Encreinte des tajamaras. Même allure que la section antérieure avec un nouveau canal contre la rive droite à partir de 1942. Ce phénomène s'explique par la construction en 1942 de deux espalones. A (1)

Contournement de la barre: Les deux espalones ont été construits en 1942. Ce phénomène s'explique par la construction en 1942 de deux espalones. A ce moment la profondeur de la rive droite était faible mais l'affaiblissement intervenait et sur la face aval des canaux s'étaient formés. L'érosion s'est poursuivie dans ces canaux et la conséquence a été la formation d'un canal. Celui-ci ne s'est pas maintenu vers l'amont au-delà de l'obstacle, continuant sur la section.

Deux canaux: Au point de vue hydraulique la situation en 1935 était très mauvaise: deux canaux collés aux rives et séparés par un banc central. La situation a beaucoup évolué depuis. L'objectif, pour que le débit du fleuve ne soit pas entravé en deux endroits.

Evolution des aires des sections latérales	1935 (1 ^{re} effon. de la barre)	1942 (2 ^{de} effon.)	1947
(1)	9500 mts ²	6500 mts ² (réduction de l'aire)	5500 mts ²
(2)	"	entre 1935-45	"
	450	7500 aires	"

Après 1947-48 augmentation lente due aux travaux vers une limite osseuse située en 1956 à 7500 mts².

Interprétation: Les effondrements de la barre sont accompagnés par des approfondissements généralisés qui atteignent jusqu'à la section (1). Mais après, le processus d'insubmersibilité reprend d'autant plus vite que les sections sont proches de la barre. A partir de 1947-48 la diminution du débouché linéaire provoque un approfondissement du lit et une augmentation de la section, due à une augmentation de la puissance de courant (accroissement des vitesses au fond). En fait les effets bénéfiques d'une réduction de la débouché linéaire tend toujours vers une limite (d'ailleurs la barre de 1935) car les pertes d'énergie augmentent très rapidement. En théorie en tout cas la débouché linéaire peut toujours être réduite sans inconvénient et sans inconvénient à condition que dans l'ordre de la section à l'embouchure soit plus grande que celle des sections en aval. C'est en quoi s'est inspiré d'ailleurs le projet de 1948 préconisant deux espalones.

Evolution des fonds de la barre.

Déforma-: Les lignes de niveau devant l'embouchure sont dé-
 tion des Formées jusqu'à -200 mts mais la barre évolue peu
 lignes de au-delà de 100 mts.
 niveau

entre -20 et -100 mts les lignes de niveau for-
 ment un demi-cercle centré sur Bocas--forme de
 Cone de cone à ~~régression circulaire~~ section cir-
 déjection: culaire typique d'un cone de déjection fluvial.
 fluvial et Une particularité est néanmoins à remarquer: in-
 canyons dentation des lignes des niveau, les canyons sont
 l'importance sera éclairée plus tard.

A moins de -20 mts les dépôts sont asymétriques
 avec une pente vers l'est ~~XXXXXXXXXXXX~~ faible et
 une pente vers l'ouest très accentuée.

Petite barre et: Nous appellerons la Petite Barre, du point de vue
 pratique la plus importante, l'ensemble de dépôts
 grande de moins de 40 pieds et la GRANDE BARRE, l'ensemble
 barre de dépôts ~~xxx~~ jusqu'à 100 mts (elle inclue donc la
 petite barre).

Variation des volu-: 1935-45 Les dépôts pour une aire comprise entre
 mes des de -0 et -100 mts ont été de 30 mill. mts³/an en moyenne.
 pots. Vers 1941-42, il y a eu une diminution du volume
 des dépôts dont l'explication se trouve dans les
 canyons. En outre, après 1942 la moyenne annuelle
 des dépôts est montée à 12 mill. mts³ ce qui correspond
 de près aux estimations du débit solide du fleuve.

Fonds de 0-10: 2,3 mill. m³/an en moyenne (1935-45)
 0 à -20 0-20: 10 " "

Il y a eu amaigrissement de fonds entre 1935-39 tra-
 duisant l'évolution des fonds à l'ouest du Taj. Occ..
 (ce qui prouve les plans de sondage pour la période).

Après 1945: Le volume des dépôts après l'effondrement de 1945
 reprend son allure d'avant pour les fonds 0-20.

Variation des aires: Les aires des dépôts devant l'embouchure pour des
 des dépôts cotés supérieurs à 20', 25', et 30' présentent un
 à l'embou-développement parallèle pour 1945-50.
 chure.

1945. Disparition de la barre. Les dépôts sont
 totalement dispersés lorsque ils avaient atteint
 un dével. considérable.

1945-50. Reconstitution des dépôts.

1954. Brusquement, nouvelle diminution des dépôts.
 était cela du au fait que le prolongement du Taj. Or.
 et la construction commençait à dépasser l'extre-
 mité de l'ancien ouvrage disparu lors de l'effondrement
 de 1945. Il y a concomitance et probablement co-
 rrelation. Mais cela n'est sûrement pas dû à la
 fermeture de la voie aux apports de l'est. Plutôt,
 au fait que à fur et à mesure que le banc augmentait
 en volume, l'expansion des eaux diminuait: l'énergie
 fluviale se concentrait de plus en plus sur le banc
 stagnant devant l'embouchure et celui-ci se trouvait
 déplacé vers l'est mais cette fois la non-dispersé.

Aires des Ceci est clairement démontré par la comparaison pour dépôts de 1952-56 des aires de fonds à l'ouest du Taj. Occ. avec avant l'em- celles à l'ouest du Taj et devant l'embouchure. En bouchure fait, la croissance des ~~maxims~~ aires des dépôts a (-20') et -20' à l'ouest ^{qui} était minime avant 1954 se développe à l'ouest à une allure exponentielle depuis cette époque; tandis que la somme des dépôts (à l'ouest et devant Bocas) ne croît que linéairement et lentement (sans qu'il y ait rupture de pente). Il y a donc translation des sables devant l'embouchure vers l'ouest.

Origine des sables. Résumé.

- Le fleuve apporte 125 mill. mts³/an de sédiments vers l'embouchure.
 - La barre croît de 30 mill. mts³/an en moyenne et exceptionnellement de 120 mill. mts³/an.
 - Les apports du vent sont négligeables.
 - Il n'y a pas de courants marins qui puissent apporter des sables du large vers les petits fonds.
 - Du fait de la direction incidente, les houles dominantes (NE) peuvent engendrer de l'est vers l'embouchure mais a priori celui-ci est faible. L'existence du banc de Rio Viejo et la présence d'un canyon sur son flanc ouest confirment qu'il est si un tel transit existe, il est très faible.
 - Les études sédimentologiques excluent la possibilité d'apports notables de l'est.
- La barre est constituée exclusivement, ou quasi, des ~~maxims~~ sables d'origine fluviatile.

Mécanisme des dépôts. Formation de la barre.

sables roulés ou en saltation. Les sables roulés par le fleuve ou entraînés par saltation se déposent probablement en quasi totalité, de qu'ils franchissent l'extrémité des tamaras. Une partie, la plus lourde, des éléments en suspension s'y joignent. Ils traversent assez rapidement la couche sous-adjacente d'eau de mer qui n'est que partiellement entraînée par le flux des eaux fluviales. Ceci explique la reconstitution rapide de la barre après 1945; les apports par charriage auraient été insuffisants.

Les sables en suspension, les plus fins, déposent symétriquement de part et d'autre de l'axe de l'embouchure à une distance proportionnelle à leur diamètre. Ils constituent un énorme cône de déjection fluviale devant Bocas, et le fait qu'il soit symétriquement disposé prouve qu'au-delà de -10 mts n'intervient aucun facteur océanographique.

Ravinements et talus. Le socle ou cone de déjection devant Bocas est parcouru par des ravinement et talus, les canyons, ~~xxxx~~ selon la direction de la plus grande pente jusqu'aux grands fonds. Ces ravinements sont une de caractéristiques la plus importante de Bocas de Ceniza.

La Petite barre. La petite barre, obstacle a la navigation, est constituée par la partie supérieur du cone de déjection; elle est assez élevée pour être soumise a l'action de la mer. La houle du NE modelle les daunts de la petite barre et les pousse vers l'ouest en leur donnant la forme soit d'une flèche dont le front est orienté SE-NO, soit d'un bourrelet ayant la même orientation. Mais si le banc a l'ouest de Bocas est plus développé, cela se ~~xxxx~~ ne se doit pas tellement aux effets de la houle, mais au fait que le courant du fleuve s'arrête surtout contre la rive droite.

banc et plage a l'est Les apports extérieurs au banc est de la barre sont, comme a été déjà souligné, très faibles. L'engrèvement léger de la plage a l'est des ouvrages prouve simplement que depuis l'aménagement de Bocas, il y a eu en rémanement des matériaux dans la plage est de sa partie orientale vers sa partie occidentale. Ce qui explique d'ailleurs la tendance ~~xxxxxxxx~~ du phénomène vers l'équilibre et l'érosion observée au voisinage immédiat du taj. Or...

effondrements de la barre Lorsque la barre atteint un certain dével pement elle s'effondre et disparaît, fait qui s'est produit a deux reprises (1935 et 1945), ou au moins elle se trouve déplacée comme en 1954-56. Les explication de ces effondrements il faut la chercher dans les canyons.

Conclusion: En général, on peut dire qu'en 1956, la majeure partie du débit solide était réjetée vers le large.

Position avant-geuse Le développement poussé du delta sous-marin et l'étréoussse du plateau continental étaient favorables a l'avenir du port de B/quilla, ainsi que l'orientation du chenal de sortie car elle celle de la pente maxia. Mais cette orientation est catastrophique pour la cote ouest soumise aux effets du drift E-O et dépourvue des apports sableux du fleuve qui faisaient son équilibre. L'aménagement future de cette région doit tenir compte de ce facteur de déséquilibre. Surtout que si les apports vers l'ouest semblaient en 1956 être plus réguliers, on ne peut pas être sûr que cela ne se fasse au dépens de la plage proche au taj. occ. qui elle continuait a regresser rapidement.

Physionomie de la petite barre.

Trois é-: Banc a relief accentué vers l'est.
Bourrelet parallele au cretes de la houle (SE/NO)
Enorme banc a l'ouest dont le front presente un forte pente (NE/NO).

Le Bourrelet. Du point de vue pratique l'élément le plus important de la barre. Lorsque l'on parle de franchir la barre, il s'agit en réalité de franchir le bourrelet.

Evolution du bourrelet : Pour le bourrelet, les aires de dépôts à des profondeurs 20', 25' et 30' évoluent "en block" (courbes parallèles dans le temps), et présentent 2 maxima aux saisons d'été et d'hiver d'étiage, et deux minima aux crues, mais n'ont aucune corrélation avec le vent ou la houle. Il est à remarquer que entre 1955-57 les aires de dépôts du bourrelet continuaient à diminuer indiquant que l'équilibre n'était pas encore atteint.

Hauteur du bourrelet : D'autre part, si la hauteur du bourrelet, profondeur maxima pour un tracé donné, n'est pas en corrélation avec la force (vitesse) du vent, ni avec la hauteur de la houle sur la barre ou entre les tajameres, mais seulement avec les hauteurs d'eau, c.à.d., avec le débit.

Conclusion : Les aires et la hauteur, donc le volume, des dépôts situés au nord et entre les tajameres, sont indépendants du vent et de la houle et fonctions inverses du débit du fleuve.

Les canyons.

Direction : On a déjà parlé du canyon au flanc ouest du banc du Largeur Rio Viejo. Il y en a d'autres qui suivent la direction des lignes de courant et dont la largeur et la profondeur sont variables et la durée parfois éphémère laisse en général des traces en forme de "couvettes" ou "entonnoirs" sous-marins.

Canyon axial. La position des canyons n'est ni fixe ni privilégiée, mais la plus fréquente est un profond canyon axial dans l'axe de l'embouchure à une certaine distance vers le large. Le canyon axial existait déjà en 1935, mais il serait difficile d'assister à sa naissance. En 1954, le canyon s'approche lentement de l'embouchure (point central joignant les extrêmes des tajameres); en 1955, presque pas d'évolution, et en 1956, le canyon axial s'approche rapidement et à Bocas, jusqu'à 500m, accélération qui expliquerait l'amaigrissement anormal de la barre à cette même époque. Nous nous rappelons aussi qu'en 1942 il y a eu un amaigrissement inexplicable de la barre; et on constate que cet amaigrissement fut accompagné par la formation d'un grand nombre de canyons.

Les canyons sont peut-être la caractéristique la plus importante de Bocas de Ceniza. Le canyon axial est le principal, mais il existe aussi d'autres canyons affluents dont l'origine est mal connue. On pourrait ajouter que ces canyons ne s'observent que dans des mers non-bordées par un plateau continental, comme p. e., celle de Caraïbes.

La dynamique des canyons.

- Notions générales Formation des canyons :
- a) Tout talus de sable présent un profil d'équilibre statique, fonction de la granulimétrie des sédiments.
 - b) Une force infiniment petite, un trouble quelconque peut déclencher une "avalanche" qui creuse un canyon (l'expérience pour le Rio Gardalen fut conduite plusieurs fois à n'importe quel réduit).
 - c) Un canyon apparaît donc à la suite d'une rupture de l'équilibre local de la masse des dépôts constituant la barre.

- Rupture de l'équilibre causes :
- a) Une telle rupture peut être causée :
 - 1) L'angle d'équilibre dynamique étant une fonction de la vitesse des courants ($\alpha: f(1/V)$), celui-ci diminue lorsque la vitesse augmente jusqu'au moment où l'équilibre est brisé. Ceci expliquerait pourquoi les canyons se forment suivant les lignes de courant.
 - b) Par la croissance des dépôts qui augmentent la charge statique.
 - c) Par l'ionisation des argiles qui composent une partie des sédiments. Les ions Ca^{++} peuvent être facilement échangés par Na^{+} ($NaCl$ de la mer) avec une modification profonde de la structure cristalline des dépôts et une diminution considérable de la résistance mécanique.
 - d) En outre, les canyons sont parcourus par des courants dirigés tantôt vers le large,
 - a) courants de turbidité trajectoires qui parfois revêtent une intensité exceptionnelle qui donne lieu à des "avalanches"; on les attribue aussi la rupture des câbles sous-marins;
 - b) courants froids de compensation constitués par de l'eau de mer et qui peuvent être quasi permanents. Ils contribuent à la formation des canyons.

L'existence de canyons implique dans tous les cas une profonde instabilité des dépôts de la barre. On peut expliquer les effondrements généralisés de 1935 et 1945 comme ayant les mêmes causes que les canyons.

L'explication concernant la diminution de la résistance mécanique due à la modification de la structure cristalline des dépôts est probablement la plus rationnelle pour la formation des canyons. Il n'y a en tout cas aucune corrélation entre les ruptures du câble sous-marin et l'apparition des canyons, et les mouvements sismiques (secousses, etc) dans la région. Une telle explication ne se conforme pas avec les faits.

Le Modèle.

Réproduction à échelle réduite des caractéristiques du fleuve et de son embouchure.

- a) Forme du lit
- b) Régime du fleuve
- c) Condition de propagation des marées
- d) Cote, 3,5 kms vers l'est, 5 kms vers l'ouest englobant ainsi largement le champ d'évolution de la barre.

Evidemment l'échelle n'est pas la même dans toutes les directions étant données certaines considérations pratiques et certaines simplifications possibles.

P.e., longueurs horizontales, 1:300
" verticales, 1:250
Temps, 1:24,5.

Variables

à régler:

- a) Marées
- b) Courants marins
- c) Houles
- d) Débits fluviaux (liquide et solide)
- e) Pente Hydraulique
- f) hauteurs d'eau
- g) Représentation des fonds mobiles (et leur évolution)
- h) Sédimentologie
- i) Champs des vitesses des courants.

Tarage du
Modèle:

Une fois les variables réglées, il faut, selon la méthode du L.H.M.F., les vérifier contre les conditions en nature pour assurer une véritable reproduction de rigueur scientifique.

Résultats des essais

a) Prolongement du Taj. Occ. dans son axe. (fig. 1, #49)
Après une année: -5 mts., barre dans l'axe de l'embouchure.

b) Prolongement du Taj. Or. dans son axe. (fig 2, #49)
Le chenal s'établi préférentiellement contre le nouvel ouvrage (rive droite). Résultat médiocre.

XXXXXXXX

c) Prolongement du Taj. Oriental incurvé vers l'ouest. (fig 3, #49).
Profond chenal s'appuyant contre l'ouvrage (rive droite) qui se forme presque immédiatement.
Après une année et demi: Depots rejetés vers l'ouest. Affouillement à l'extrémité du prolongement, la houle provoque un approfondissement à l'est du digue (dangereux).

Après 2 ans et 1/2: Au moins -10 mts dans le chenal, mais sa forme rend la navigation difficile.

d) Prolongement du Taj. Occ. incurvé vers l'est. (fig. 4, #49)
Après une année la barre se forme dans le nouvel axe de l'embouchure.

e) Calibrage de l'embouchure.

1) Réduction de la débouché linéaire (largeur entre les digues) à 500 mts.

Après deux ans, le chenal tend à se fermer contre la rive gauche, puis, il se readresse dans l'axe de l'embouchure coupant la barre en deux. On peut craindre que ce chenal quasi rectiligne ne soit pas inestable.

ii) Réduction de la débouché linéaire à 400 mts. (Fig 6, #49)
Le chenal se forme sur la rive gauche, mais la coupure de la barre est moins nette; il y a toujours le bourrelet à franchir.

XXXXXX

f) Calibrage et incurvation vers l'ouest d'une digue à partir du Taj. Or..

i) Calibrage et incurvation. (Fig 7, #49).

Après deux ans, chenal contre la rive droite qui dépasse -10 mts sur la barre.

ii) Prolongement de l'incurvation. (Fig. 8, #49)

Après deux ans résultats encore plus nets. Le chenal dépasse -12 mts sans discontinuité.

g) Solutions sans intérêt pratique.

i) Prolongement simultané des deux Taj. (dans leur axe et inc

ii) Prolongement du Taj. Occ. vers l'ouest.

iii) " " " Or. " l'est.

Remarque. Les essais furent faits sans les canyons, mais leur présence ne ferait qu'augmenter la marge de sécurité.

analyse poussée de la meilleure solution trouvée dans les essais préliminaires.

Prolongement du Taj. Or. incurvé vers l'ouest.

1 1/2 années: Le chenal s'est établi sur le côté ouest du nouvel ouvrage; -36' et sera plus à l'extrémité de l'ouvrage.

3 années : Le chenal rejoint le canyon axial. Envasement du lit, -40' au minimum dans le chenal.

4 années : La situation n'évolue plus, toujours -40'. Le résultat ainsi obtenu est excellent, mais il pose un nouveau problème relative au chenal fluvial.

Chenal
fluvial:

Les profondeurs dans le fleuve une fois franchit la barre, dépassent 40' suivant d'abord le chenal dans la rive droite, et en suite, à partir de l'épis #1 dans celui de la rive gauche jusqu'à B/quilla. Avant Las Flores les profondeurs sont égales ou supérieures à 40' et au-delà atteignent fréquemment 60', sauf pour en banc de 27' situé entre les deux chenaux. Pour bénéficier de l'approfondissement à Bocas il faut donc assurer la continuité de 40' entre la barre et B/quilla.

banc de
27'

Solution: Une telle continuité peut s'obtenir par des épis sagement placés ax de type agressif ou classique. Par sa construction un épi joue un rôle de dévier; les courants subissent sur sa crête une déviation et s'incurvent vers le fleuve. En amont

comme en aval de l'épi les ~~xxxxxxx~~ vitesses sont relentis dans l'ombre des ouvrages et il en résulte la formation de dépôts. Le chenal se trouve donc déplacé vers l'axe du fleuve.

Essais avec des épis

- a) Epi agressif a 1.230 mts. de l'extrémité du Taj. Occ. (Fig. 1, #52)
Par les effets de la houle ~~xxxxxxxxxxxx~~ qui gêne la formation de dépôts augmentant la turbulence en aval de l'ouvrage, les résultats s'avèrent moins bons que l'on ne pouvait s'attendre. Néanmoins, le chenal se trouve déplacé vers la rive droite et le banc a une profondeur de -35'.
 - b) Epi classique, même position.
Le résultat est à peu près le même. Le choix entre les deux types d'épis est donc technique. L'épi agressif nécessite un enracinement plus fort quoique moins de matériaux. L'épi classique a d'autre part l'avantage d'assurer une correction du fleuve par une action en profondeur agissant seulement sur le lit mineur, sans modifier la section du lit majeur et l'évacuation des crues.
- Dragage: Pour obtenir les 40' ~~xxxxxxxx~~ désirés, un chenal de 150 mts de largeur et 40' de profondeur a été dragué dans le creusement du banc, mais le chenal tend à s'obstruer légèrement et un seuil de 38' apparaît.
- c) Epi classique a 1730 mts. (Fig. 4, #52)
 - d) " " " 2930 " " 5 "
- Résultats moins bons, les épis sont d'autant plus efficaces qu'ils sont implantés plus en aval.

Difficultés dans la construction d'un prolongement du Taj. Or. incurvé vers l'ouest.

Ouvrage: Celle-ci est sans doute la meilleure solution possible du point de vue hydraulique, mais sa construction offre quelques problèmes d'ordre technique. Le prolongement du Taj. Or. terminé en 1954 était déjà insuffisamment stable. Or, un prolongement d'encore 400 mts serait soumis vers l'est aux houles parfois violentes ~~xx~~, vers l'ouest à une érosion menaçante et dans son extrémité à l'instabilité des fonds due à la proximité du canyon axial. L'ouvrage impliquerait la mise en chantier des moyens particulièrement puissants, plus puissants que ceux utilisés jusqu'à maintenant à Bocas, car il devra être très robuste.

Solution: Pour diminuer le cube des matériaux à mettre en œuvre on pourrait envisager une construction émergente à son origine (dans l'extrémité actuelle du Taj. Or.), et avec un profil plongeant jusqu'à son extrémité; la houle captée serait moindre, et l'érosion fluviale moins intense en particulier lors des crues car l'expansion des eaux ne serait pas empêchée.

Essais: En modèle réduit un ouvrage de ce type donne les résultats:

Après deux années: La houle déferlant sur la digue entraîne des sables qui se déposent du côté du fleuve, le chenal se trouve déplacé vers l'axe du fleuve. Il y a augmentation de l'affouillement au pied des épis de la rive droite. Profondeur: -38'.
Après 4 années: Les tendances s'accroissent. Le résultat est aussi bon qu'avec la digue du type émergente.

Remarque. Etant donnée la nature des essais il fut impossible de tarer les résultats, mais il sont, qualitativement au moins, valables.

sur la barre
effet de l'utilisation des épis /

Si des épis peuvent être employés pour un creusement du lit pourquoi ~~ne pas~~ ne pas les utiliser pour obtenir le même résultat sur la barre elle-même. Ils ont l'avantage de la simplicité et du moindre coût; judicieusement placés ils pourraient servir à obtenir des résultats au moins prévisibles, car on pourrait:

- avantagesa) Transformer les deux chenaux en un seul, situation des épis. nettement meilleur du point de vue hydraulique.
b) Accentuer certaines tendances favorables de l'évolution de l'embouchure:
i) que la section entre les tamaras semble encore augmenter.
ii) que l'importance du bourrelet de la petite barre diminue.
iii) que le canyon tend à se rapprocher de l'embouchure et/or s'élargir.
a) Eloigner le plus rapidement possible le chenal de la rive droite des ouvrages dont la stabilité est déjà médiocre.

essais

avec des: a) Junction des deux chenaux par deux épis classiques épis perpendiculaires à l'axe du fleuve à 6 kms de l'embouchure (passage axial 400 mts). Formation immédiate d'un chenal (-35') qui coupe le bourrelet et rejoint le canyon. Le "gain" est notable en dépit des pertes élevées d'énergie qui entraîne un procédé trop brutal.

- b) Essais avec différents types d'épis implantés dans la rive droite au premier espalon (agressif) et dans la rive gauche à diff. positions. Les résultats sont excellents, surtout si l'épis dans la rive gauche (classique ou ~~agressif~~ agressif n'est qu'à 200 mts de l'extrémité du tamar. Il y a creusement de la barre et à fonds de -35' à -40'. Il est néanmoins, à remarquer que la réalisation des épis agressifs pourrait présenter des difficultés étant donnée que leur construction n'a été jamais entreprise en Colombie.

Calibrage de l'embouchure.

(I) Solent.

Recommandée:

Plongation de 400 mts du
raj. Or. moderne des l'ouest
(Voyage 1904 510 mts).
Encrements ou plongant selon
les besoins d'usage en creux
(ou creux) accompagnés d'un épi
après plongement à 1250 mts
de l'extrémité du raj. Or.
pour creux le barié entre
les deux chenaux.

(I)

Pour que des
rediments
puissent et
provenir du
niveau relatif
de l'altitude
l'axe principal
l'œuvre et
étant de
un effet de
la lame.

(a) L'axe principal plongant encaissé
sur l'espèce + 1 rue d'axe d'un
type qui "pourrait être entrepris
incomplètement avec les matériaux
et selon les techniques en usage
Il aura aussi une multitude de
vitesses du courant qui pourraient
le décaler la lame et de ce fait
peuvent recouvrir le résultat

(b) Deque le calibrage de l'auteur
vers l'aval "est cet ouvrage
n'est pas à la fois le plus simple
et le plus efficace le sans ceux
étudiés; mais c'est celui qui
serait le plus long prospecteur
d'ouvrir

de moins
continuant
ou dépendant
de certaines
supplémentaires
de l'œuvre.

Suivre l'axe principal
de l'axe principal
canyon de l'axe
vers l'ouest
pour étudier
l'axe du
canyon

En ayant d'ouvrir de nouvelles
relativement l'axe, et progressivement
plus fort. Dans son état d'axe
dans l'axe, a été fait au choc
de l'axe, et a l'axe principal
l'œuvre devrait être suffisante
mais si par une raison le canyon
de l'axe, dans l'axe, ou
pourrait être en plongement
vers l'ouest. Cet plongement
pour être dans sans les axes, la
base des projets principaux dans
un mieux plus éloigné.

En dernier, vers l'axe la
deque pourrait être précédé

15 Junio, 1959. - Contrato terminado. -

Hokanson - Cia de Ingenieros y Construcciones S.A.
Desde columnas adyacentes. Dirección del
Mun. de O.P. Construcción y estructura.
Alto según: Alexander Smith y Co (Londres)
y L. C. H. F. -

26 Oct 1959. -

Reducción de la Rosebud a 610 mts. -

Continuación del trabajo de 1951-54.

1959 = 714 mts.

610 según la recomendación del Sr. Taylor. -

Longitud necesaria 245 mts. -

Medio de Herrel. sujeción y sellado.

Feb 1959. - 100 mts en sujeción
de 40 mts. -

Inspección de material (pilotes)
por la Junta Coordinadora del
Puerto. -

18 de Junio. - 177.50 mts del medio
complet. construido (sujeción
de 120 mts). Suspensión de
la línea para continuar el sujeción.
nuevo.

Construcción continua. -

Estudios

Oct 19 59. - Heliofobia y oceanografía³⁰

Werner Otto Reichelt.

Inst. de un labor.

Reorganización de la
Escuela de Hidrografía,
Oceanografía y Meteorología.

Examen entusiasta y detallado

de los datos - Terminal (y e micción de
los estudios sobre la escuela de
(Madagascar)

datos: Hacia, oceanografía, oceanografía
sustitución, contaminación, aguas,
sunder, etc. -

aproximación de los comentarios, reunión,
fraseología y unificación de los planes
de la escuela, etc. -

Canal. -

1959 17' - 19'

JUNIO

Julio

agosto

Sept

Oct

Nov.

Dic

1960 Ene.

Feb

Marzo

Abril

Mayo

17' - 18'

17' - 18'

18' - 19'

18' - 20'

18' - 20'

18' - 20'

19' - 21'

19' - 20'

19' - 21'

19' - 21'

19' - 22'

Junio 1959. -

Calado máximo 16'

de los buques

Dic 1959 17'

Mayo 1959 19 1/2'

Propiedades -

~~1955~~ 2000

1956-59 2 millones paño

1960 8000000 mull

1961 8000000 mull

Reconstrucción parcial de la copia a carbón en francés recibida del Dr. Rodolfo Segovia Salas, elaborada por la Dra. Myriam Cabrales.

Bocas de Ceniza ou l'aménagement de l'embouchure du Rio Magdalena.

R. E. Segovia

Paris, le 19 février 1962

-I-

Caractéristiques générales du fleuve.

- Longueur :** 1532 kilomètres (km), dont approximativement (approx.) 1300 km navigables.
 Barranquilla-Magangué 4 mètres (m) tirant d'eau.
 Magangué-Honda (rapides à 947 km) 1,5 m tirant d'eau.
 (Le débit n'est pas insuffisant pour la navigation jusqu'avant Honda dans ce cours moyen qu'aux basses eaux de janvier, février et mars grâce aux nombreuses lagunes qui servent de bassin de régulation. Extension approximative de 2200 km² qui se remplissent au moment des crues et se vident aux basses eaux.). Au-delà de Honda, navigation à tirant variable selon la hauteur des eaux.
- Affluents :** 42 de plus au moins grande importance. 23 à la rive gauche dont le Cauca, le plus important à 322 km de la mer (pas d'affluents importants après) et 19 à la rive droite. Pas d'affluents entre Yuca et la mer.
- Surface du bassin :** 440.000 km², vallée entre les cordillères Centrale et Orientale.
- Pente :** La source se trouve à 4,270 m.
 Source-Purificación. Régime torrentiel entre 2 et 6/1000.
 Purificación-Rio Carare. Cours moyen : 2 à 0,04/100.
 R. Carare-mer. Cours bas : 0,39 et 0,04/1000.
- Régime des crues :** Les crues suivent les pluies. Deux saisons pluvieuses. :
 Mai-juillet (max. juillet).
 Octobre-décembre (max. nov., celle-ci étant la plus élevée).
 Étiage : mars-avril.
 Différence des hauteurs entre basses et hautes eaux à :
 Girardot : 9 m (11 m lors de très fortes crues).
 Dorada : 5-6 m.
 Calamar : 6 m (lors de très fortes crues, les eaux se répandent dans la plaine).
- Débit (liquide) :** En 1956 (année considérée comme moyenne) 260 330 000 m³/an.
 L'apport du Cauca augmente le débit de 60 à 80 % et après ce point, le débit reste sensiblement le même jusqu'à la mer.

Géologie Vallée :	Effondrement tertiaire postérieur au soulèvement de la cordillère Orientale. Couverte par la mer au crétacé. Plusieurs transgressions, la dernière au crétacé supérieur. Après la retraite de la mer et le soulèvement de la côte, vallée constituée par des formations sédimentaires (grès, poudingues, sédiments volcaniques et gravats d'origine glaciaire).
Géologie Partie Maritime :	À partir de Calamar : Rive gauche : roche sédimentaire d'origine marine (Éocène). Le Canal del Dique n'était probablement qu'un ancien bras de l'embouchure (delta), l'actuel Departamento del Atlántico n'étant qu'une île rattachée au continent par les dépôts du fleuve. Les dunes anciennes et ciénagas dans le bassin du canal renforcent cette idée. Le Canal del Dique reliant Cartagena avec la Magdalena a tendance à se combler à chaque crue et l'on doit y maintenir une drague. Rive droite : plateau de formation deltaïque. Bras morts qui débouchent dans des ciénagas dont la plus importante, Ciénaga Grande, formait probablement partie de l'ancien estuaire et se trouve aujourd'hui séparée de la mer par un étroit cordon de sable. La Boca del Rio Viejo, à l'extrémité est de ce cordon de sable, était probablement, il y a plus de deux siècles, le débouché sur la mer du bras principal du fleuve. Aujourd'hui, l'accès par cette boca est presque impossible, mais le canal Barranquilla – Ciénaga rejoint une partie de cet ancien bras. Entre le fleuve et la Ciénaga Grande, la forêt est inondée. Marécage absorbant une partie non négligeable des eaux du fleuve. Cependant, ces pertes semblent être compensées par des apports locaux, car le débit à Barranquilla est sensiblement égal à celui à Calamar.
Le lit de Barranquilla à la mer :	Longueur du lit entre les lignes de niveau -6 m : 700 m et varie peu (il y a une section plus étroite peu en aval de Las Flores : 640 m). Section mouillée (Barranquilla-mer) : 7000 m² et varie peu. Lit mineur : Terminal -km 4 : Rive gauche Km 4 – km 8 : Rive droite Km 8- Embouch. : Rive gauche (le chenal dans la rive droite ayant aussi une certaine importance). Fond : Probablement rocheux. Coral le long des quais du terminal. Mais le lit est dans l'ensemble sableux et très irrégulier. Nombreuses rides sur la surface du lit, quelques-unes étant des dunes de plusieurs mètres de hauteur. Plus en amont, dans le cours moyen, apparaissent au moment des basses eaux d'énormes bancs de sable qui changent de forme continuellement ; ce sont eux qui alimentent le charriage à l'embouchure (et constituent un formidable obstacle à la navigation).

Accès au fleuve :	L'accès de la mer par las Bocas a été toujours une difficulté. Pendant l'époque coloniale, le Magdalena constituait la seule voie vers l'intérieur du pays (ceci est d'ailleurs toujours vrai), mais le commerce avec la métropole ne se faisait pas par Barranquilla, petit village alors sans importance, mais par Cartagena, baie d'eau profonde et point d'arrêt des convois. De Cartagena au fleuve, voyageurs et marchandises prenaient le Canal del Dique, déjà utilisé au XVI ^e siècle et objet d'aménagements au XVII ^e . Cette voie n'a été d'ailleurs jamais complètement abandonnée. D'importants travaux de dragage furent entrepris entre 1923 et 1929, et continuent aujourd'hui, mais les résultats ont été plutôt décevants. En outre, un chemin de fer relia Cartagena avec Calamar en 1894.
Carte Mosquera :	Une carte datant de 1849 montre qu'à cette époque, l'embouchure du Magdalena occupait une position pas du tout voisine de l'actuelle. À l'ouest de las Bocas se trouvaient une série d'îles qui encombraient l'embouchure, mais qui protégeaient le petit port de Sabanilla, liaison entre Barranquilla et la mer.
Évolution favorable :	À partir de 1850, la barre de Bocas se creuse permettant la navigation jusqu'à Barranquilla à des bateaux de 7,50 tirants d'eau. Le tonnage (ton) annuel atteint 23.000 en moyenne. Cependant, en 1884, le trafic est de nouveau interrompu à cause des accidents. La barre se reforme, et en 1884, il n'y a plus que 4-5 m (13-14') de fond. Sabanilla redevient le port, relié à Barranquilla par un chemin de fer.
Puerto Colombia :	Quelques années plus tard, les îles à l'ouest de l'embouchure disparaissent formant au lieu une longue flèche de sable qui culminait dans l'îlot Verde (nord de Punta Hermosa). À l'ombre de cet îlot, Puerto Colombia, à quelques kilomètres à l'ouest de Sabanilla, devient le port doté d'un grand quai d'accostage modernement équipé et relié lui aussi à Barranquilla par un chemin de fer.
Premières études :	Au début de ce siècle, Barranquilla obtient son indépendance politique de Cartagena avec la création du Departamento del Atlántico dont elle est la capitale. L'agitation en faveur de la canalisation des Bocas prend corps et la pression politique donne naissance aux premières études : 1907, Lewis Haupt : les sables de la barre ont une origine maritime venant de l'est. 1914, Julius Berger : levé général du fleuve et consultation sur las Bocas. Confirmation de l'existence d'un courant maritime venant de l'est. 1920, Black McKenney & Steward : Projet comportant deux jetées parallèles perpendiculaires au courant du littoral. La distance entre les ouvrages correspondrait au rayon hydraulique théorique pour un débit maximum et une profondeur de 30' (700 m). Mais pour éviter des accidents

(surtout lors de fortes crues), on adopta un rayon de 877,6 m, convenant de le réduire encore (par épis) si la distance choisie se révélait insuffisante.

Initiation des travaux : 1924-1930. Ulen & Co.
1934. Reprise des travaux par la Winston Co.

Travaux de la Winston : Dique Boyacá (Las Flores au Cap Augusta) : Il avait par objet :

- a) Isoler le lit du fleuve des « ciénagas » de Mallorquín y Cantagallo qui absorbaient une partie non négligeable du débit du fleuve ; et
- b) protéger la rive gauche contre la forte érosion causée par les courants et la courbure du fleuve.

Construction : Pierre de carrière déposée en profil trapézoïdal, voie ferrée, et 4 épis entre les kilomètres 2 et 6 comme protection contre l'érosion.

Tajamar (brise-lames) Occidental : Prolongation du Dique Boyacá et dans la même direction que celui-ci (347°). Il comporte une ossature en pieux de bois et d'un enrochement calcaire mis en place (forme aussi trapézoïdale) par déferlement. La voie ferrée du Dique est elle aussi prolongée sur le tajamar. 1.600 m construits entre avril et septembre 1934.

Tajamar Oriental : Prolongeant lui aussi une digue similaire à celle de la rive gauche (noter cependant que cette digue et sa voie ferrée ne suivent pas une ligne droite, mais la rive de la Ciénaga de la Punta Faro). 800 m construits entre janvier et juin 1935.

Chenal : En janvier 1935, la barre se creuse donnant lieu à un petit chenal de 10 m étroit et irrégulier.

Effondrement de la barre : Le 29 août 1935, 430 m du tajamar occidental s'effondrent et la barre de Bocas n'existait plus. La formation d'un chenal de 30 m de profondeur suit la disparition d'environ 30 millions (mill.) de tonnes (t) de sable entraînées vers le large. L'avalanche endommage le câble sous-marin Puerto Colombia-Maracaibo, 30 km au large.

Le 7 décembre 1935, 54 m du tajamar disparaissent encore. En tout cas, le problème de Bocas de Ceniza semble résolu et Barranquilla assurée d'un accès direct à la mer. Mais...

Reconstitution de la barre : À partir de 1940-1941, la barre commence à s'étendre et les fonds diminuent. On consulte :
Dent, qui après une courte reconnaissance des Bocas, proposa en mars 1945 une contraction de l'embouchure.

Le futur :

Or, pour la première fois dans ce siècle, le port de Barranquilla va se trouver en face d'un concurrent sérieux. Le Ferrocarril del Magdalena reliant Bogotá avec Santa Marta vient d'être achevé. Le fleuve perd son monopole de 4 siècles. Entre 1950 et 1952, le trafic dans le fleuve représentait 24 % du ton/km transporté dans le pays ; depuis lors, par la seule concurrence de la route et du port de Buenaventura (Pacifique), le pourcentage a diminué.

Selon les prédictions, le chemin de fer enlèvera au fleuve 20-30 % du trafic dans le cours inférieur et 80 % dans le cours moyen. Étant donné que la navigation dans le cours moyen est constituée dans sa plus grande partie par la liaison de Barranquilla avec les grands centres de consommation à l'intérieur du pays, le second chiffre pourrait être catastrophique. Pour faire face à cette menace, les compagnies de navigation poussent l'aménagement du fleuve et la modernisation des ports ; avec une rationalisation du transport, le fleuve restera, au moins, pour certains types de marchandise, l'acheminement le plus économique.

D'autre part, une branche reliant Barranquilla au Ferrocarril del Magdalena est en voie de construction. Tout le trafic ne sera donc pas détourné vers Santa Marta, surtout que Barranquilla a à sa faveur le poids de la population : 500 000 hab. contre 50 000 hab. pour Santa Marta. Mais le port, dans les conditions présentes, est condamné. L'avenir de la ville dépend de la maîtrise de Bocas de Ceniza, de la solution définitive du problème. Voici donc le résumé des études faites par le L.C.H.F. pour mettre le milieu naturel au service d'une ville et d'un pays.

- IV -**La nature de l'embouchure.**

L'étude des conditions à l'embouchure du Rio Magdalena conduit à la réponse d'une question capitale du point de vue pratique : Pourquoi se forme-t-elle la barre ?

Les recherches océanographiques, hydrographiques et sédimentologiques nous donnent l'origine de la barre et constituent le préambule à la réponse d'une seconde question encore plus importante : Quoi faire pour s'en débarrasser ? Cette seconde démarche, nous l'examinerons plus tard, si le temps nous le permet suivant les méthodes en modèle réduit utilisées par le L.C.H.F.

Régime des marées**Faibles dans la région :**

Elles sont de faible amplitude à Bocas, dépassant rarement 0,50 m. Elles ne semblent pas engendrer des courants le long de la côte.

Dans des conditions exceptionnelles, une très faible onde se fait sentir à Calamar, 90 km en amont.

Pas de reversement de courants : Il n'y a pas de reversement de courants, mais simplement surélévation du volume d'eau stocké à l'embouchure. Parfois, on a constaté un reversement de courants dans le fond (teneur de NaCl [chlorure de sodium] à Barranquilla supérieure à la normale), mais le phénomène est rare.

Amortissement : Aux hautes eaux l'amortissement est de l'ordre de 30 % ; la marée montante se traduit simplement par un ralentissement du courant.
L'énergie de la marée reste, dans tous les cas, faible par rapport à celle du fleuve (4-15 % dépendant du débit). « Inutile de spéculer sur son utilisation pour modifier, dans le sens cherché, le régime de l'embouchure. »

Régime des courants marins.

Permanents : Courants marins permanents s'étendant à de grandes masses d'eau et observables loin des côtes, par exemple, Gulf Stream, il n'y pas au large de Bocas, susceptibles d'influencer sur le régime de l'embouchure.

Dus à la marée Marées : presque pas comme déjà vu, c'est-à-dire, il n'y a pas de grands déplacements de masses d'eau qui changent de sens -c'est leur caractère spécifique- lors de reversements.

À la houle : Houle : Courants dus à l'expansion latérale de la houle entre la zone de déferlement et l'estran et dont la force est fonction de l'énergie de la houle et de l'angle des crêtes par rapport au rivage. (Voir régime des houles)

Au vent Vents : Courants de superficie qui peuvent donner naissance à des courants de compensation dans le fond, engendrés lorsque le vent souffle dans une direction donnée assez longtemps. (Voir régime des vents.)

Régime des houles

Houle dominante : Direction : venant du NNE (nord-nord-est) -NE (nord-est).
Période : 5 à 8 secondes (max.)
Amplitude : 3 m (sur la barre)
Il y a aussi parfois une houle venant du N (nord) ou NO (nord-ouest), moins cambrée et dont l'amplitude est approx. de 10 m.

Pénétration : Toutes pénétrant le fleuve, la distance étant fonction du débit du fleuve en ce moment, normalement jusqu'à la presque île Punta Caiman.

Courants : L'étude de la propagation de la houle depuis le large jusqu'à la côte permet de concevoir la répartition de l'énergie et prévoir l'apparition des courants.

Est : Il n'y a presque pas de courants de houle à l'est de l'embouchure, ou très faibles dans la direction est-ouest, sauf pour la houle qui aborde le tamar oriental a une incidence inverse de la précédente et qui peut donner lieu à des courants NS (nord-sud) au voisinage de l'ouvrage.

Ouest : Ici, par contre, l'incidence de la houle est très forte engendrant des courants de houle non négligeables.

Dissymétrie importante :

Pour la houle N ou NO, l'incidence est évidemment différente ; à l'ouest pas de courants, à l'est, par la forme de la plage, le courant engendré aura toujours une direction SO (sud-ouest), mais encore, moins forte.

Régime des vents

Vents dominants :

Direction : venant du NE-NEK*.

Courants

Ils peuvent engendrer des courants de superficie avec leurs courants de compensation correspondants au fond.

Apports de sable

Ils jouent donc un rôle dans l'évolution des stocks sableux, notamment à l'est de Bocas. Mais il serait faux *** que le vent est l'une des causes principales de l'ensablement de l'embouchure. Selon cette théorie, émise pour la première fois par Haupt, le vent entraînerait des sables des estrans secs (dunes à l'est de Bocas) dans le fleuve ou sur la barre. Il voyait la preuve, et autres d'après lui, dans le fait que le tamar oriental et sa voie ferrée s'ensablent parfois. En réalité, comme nous verrons plus tard, les apports du vent sont négligeables par rapport aux autres apports de l'ordre de 0,1 mill. m³/an contre plus de 100 mill. m³/an. Il y aurait, néanmoins, intérêt à fixer les dunes à l'est par une végétation appropriée.

Débits et hauteurs d'eau dans le Rio Magdalena

La hauteur varie linéairement avec le débit

Les débits et hauteurs d'eau suivent le régime de pluies déjà décrit. À Calamar on a enregistré : max. 12 000 m³/s, min. 2000 m³/s. La hauteur d'eau varie linéairement avec le débit (au moins dans la partie maritime). La variation des niveaux d'eau a la même allure à Barranquilla et à Calamar (encore une preuve de la faiblesse de la marée). Une variation de 1000 m³/s à 8000 m³/s correspond approx. à 1 m de hauteur.

Au large

D'autre part, au large, le niveau est indépendant du débit et les variations ne sont pas dues qu'à la marée. Celle-ci étant faible, le niveau moyen au large est à peu près constant.

Pentes hydrauliques et rugosité des fonds

Dans la partie maritime, la pente hydraulique est une fonction directe du débit. À Calamar, elle passe de 0,64/1000 aux hautes eaux à 0,4/1000 aux basses eaux et des différences semblables subsistent jusqu'à la barre même.

La perte d'énergie due à la rugosité des fonds n'est pas très grande à Bocas et elle est indépendante du débit.

Récupération d'énergie et calibrage :

Les dissipations d'énergie à Bocas de Ceniza ne semblent pas excessives ; le calibrage de l'embouchure ne permettrait en récupérer beaucoup ; s'il est fait, il faut qu'il soit conçu rationnellement pour modifier le moins possible le régime **assez satisfaisant** du point de vue énergétique.

Débits solides fluviaux

Notions :

Le débit solide se compose du :

- a) Débit solide en suspension.
- b) Débit solide entraîné par saltation ou par roulage.

Suspension :

Débit solide en suspension : La teneur en matières solides en suspension croît avec la vitesse et la turbulence, c'est-à-dire, au moment des crues. D'une manière générale : T_b : débit sol. susp./Débit du fleuve : ****/****
Celle-ci est une loi statistique limitée par des écarts parfois considérables. La principale déviation de la nature variable des matériaux en suspension. Or, ces matériaux se modifient à mesure que les eaux montent, car les premières pluies enlèvent, tout d'abord, les argiles et les éléments fins.

Variations des concentrations :

Pour le Magdalena, par exemple, on trouve en octobre un grand pourcentage d'éléments fins. Plus tard, le pourcentage de sable augmente tandis que la concentration de matériaux en suspension diminue ; l'augmentation du débit ne compense pas avec une turbulence accrue les pertes en suspension dues aux sables plus lourds.

Saltation et roulage :

Débit solide par saltation et roulage : ce charriage limité à une épaisseur de 0,20 m au-dessus du lit se situe entre 10-20 % du débit en suspension, le rapport n'étant pas constant, car ils ne dépendent pas des mêmes variables ; le débit en suspension tend à diminuer à partir d'un certain niveau d'eau, tandis que les ******** apports sur le fond (roulés ou entraînés par saltation) continuent de croître avec le débit.

Débit solide total : pour un

Par des déductions théoriques, on arrive à :
125.000.000 m³/an. Ce chiffre correspond de très près à la réalité ; en 1947, le débit solide mesuré fut de 120 000 000 m³ pour un débit liquide de 6000 m³

débit liquide moyen 6000 m³/s considéré comme moyen. Un tel transport correspondrait à une colonne de 100 m de hauteur s'il était déposé sur un kilomètre carré de côte.

Nature du débit solide : La partie la plus fine est une poudre contenant des débris de mica et quartz dont le diamètre est inférieur à 0,04 mm. Ce sont, semble-t-il, des précolloïdes qui se déposent même avant floculation (phénomène lié à la présence d'ions marins bivalents).

Courant du fleuve ; expansion des eaux ; champs de vitesses

Expansion : À l'embouchure, le fleuve s'étend symétriquement de part et d'autre au large de Bocas. Les eaux du fleuve restent localisées assez près de la surface ; une couche d'eau fluviale se glisse sur une base d'eau de la mer, deux phases bien différentes, visibles 15 ou 20 km au large et 60 km lors des crues. L'expansion vers l'est n'est pas que quelques kilomètres (5), mais vers l'ouest, elle est presque illimitée.

Décantation à l'est : Il est possible qu'à l'est, les eaux du fleuve, jusqu'à 5 km, se décantent donnant naissance à un banc de sables fins, qui entraînés par la houle, peuvent revenir pour former une petite fraction des sédiments de la barre. En fait, il y a, à l'est, des courants de houle s'étendant de la zone de déferlement jusqu'à l'estran, et même, des courants d'une faible intensité (0,5 m/s) entre le phare Gómez et l'embouchure (sauf au bord même du tajamar oriental où le courant est renversé).

Sédimentologie

Analyses granulométriques, conclusions :

- a) La partie ouest de la barre présente une granulométrie relativement grossière dont l'unique source possible paraît être le fleuve.
- b) La barre ne peut pas être alimentée par des sédiments venant de l'ouest, au contraire, il y a transfert de sable de la barre vers l'ouest, jusqu'à El Laguito.
- c) Les dépôts situés à l'est ont une granulométrie plus fine ; ils peuvent -à priori- être alimentés de l'ouest ou de l'est.
- d) Devant le phare Gómez, le stock existant ne peut pas être rattaché par évolution à celui de la barre :

La barre est alimentée par le fleuve sans exclure complètement la possibilité de faibles apports orientaux sur son flanc est.

Minéraux lourds, conclusions :

- a) La quasi-totalité des matériaux qui assurent l'alimentation de la barre est d'origine fluviale.
- b) L'évolution actuelle des dépôts situés à l'est de Bocas consiste en un remaniement du stock existant qui ne peut être alimenté que dans des proportions infimes par de matériaux venant de l'est.
- c) L'influence des facteurs océanographiques sur le flanc est de la barre n'est peut-être pas négligeable en ce qui concerne le classement et la composition granulométrique des éléments, mais il s'agit certainement

d'un remaniement dans le profil et pas d'un transfert littoral des matériaux.

Cette action est donc négligeable sur la formation de la barre.

Morphologie du littoral

Plateforme continentale :	Dans cette région aux environs de Bocas, la plateforme continentale a une pente très forte qui atteint et dépasse 5 %.
Est :	À la hauteur de Santa Marta, l'isobathe -1000 se trouve à 12 km de la côte et l'isobathe -500 à 2 km et à l'est de l'embouchure, ces distances sont plus ou moins gardées. En face de Bocas, l'isobathe -1000 est à 18 km et -200 m sont atteints à 5 km des tajamares. L'étroitesse de la plateforme continentale est à remarquer.
La côte :	La côte même n'offre aucune singularité. Entre Santa Marta et Ciénaga, elle est dominée par de hautes falaises, flancs de la Sierra Nevada. Un long cordon relie Ciénaga à Bocas, l'île Salamanca qui semble avoir été modelée par des houles frontales.
Morphologie sous-marine :	On constate la présence de deux déformations des lignes de niveau : l'une, en face de la Boca de Cienaga, semble être le témoin d'un ancien bras du fleuve ; l'autre, devant la Boca de Rio Viejo, est sans doute une ancienne barre d'embouchure dont le plateau supérieur a été arasé à -11 m. Ce sont deux talus d'alluvion dont le second, de formation plus récente, est le plus petit. Tous les deux sont stables.
Ouest. Morphologie sous-marine :	À l'ouest, la morphologie sous-marine est totalement différente. À l'estran, la bathymétrique zéro est hachée (festons) désignant de nombreuses petites flèches de sable caractéristiques d'un transit littoral considérable vers l'ouest. Il y a trois déformations importantes : une émergente, l'île Verde devant Puerto Colombia, épine dorsale du système ; un énorme banc de sable, Bajío Zamba , entre Punta Galeras et Punta Piedras ; et un dernier banc, Banco de Playa Grande, au large de Cartagena. Tous les trois sont instables, et sauf, peut-être le dernier, issus des sables du fleuve, alluvions du Rio Magdalena en migration le long du continent (gigantesques "*****"). Ils se trouvent entre les lignes de -17 et *** -20 m.

Il est à remarquer que les plages **** Santa Marta jusqu'à Cartagena sont

constituées par des sables grisâtres, d'origine fluviale, d'où le nom de Bocas de Ceniza.

La côte :

À l'ouest de Bocas se trouve d'abord un cordon de 9 km reliant l'embouchure à Sabanilla derrière lequel des lagunes **protègent** aujourd'hui, les anciennes falaises de l'érosion, situées à La Playa. Sabanilla est une tête de plateau calcaire et début d'un trait de côte très instable culminant en la très instable île Verde.

Modifications récentes du trait de la côte

**Est :
Canyon du banc
du Rio Viejo
Isla Verde**

Sans importance

depuis 1935. Il ne semble pas avoir de transport *****

Pas lisible.

On a calculé que de 1845 à 1935, 270 mill. de t de sable ont disparu au large de Sabanilla, 3 mill. par an.

**Réformation de
la plage :**

Après cette catastrophe, à Salgar, **une plage s'est formée qui progresse rapidement** ; 120 m de largeur entre octobre et décembre 1955. À Cartagena, il y a stabilisation, et à Puerto Colombia, une nouvelle flèche se forme plus près de la côte, à l'extrémité de l'ancien quai.
Il est évident que la rapidité de formation des plages ne peut s'expliquer que si l'on admet l'existence, devant cette côte, d'énormes stocks mobiles de matériaux qui ne se fixent que temporairement.

Évolution des fonds (de part et d'autre de l'embouchure sans l'évolution de la barre elle-même).

**Est :
Canyon du banc
du Rio Viejo**

Presque stables. Le banc de Rio Viejo n'a pas bougé depuis 1935. Il ne semble pas avoir de transports solides par les grands fonds ou fonds moyens.
Il y a, à l'ouest du banc, un canyon s'étendant jusqu'à la bathymétrie -5 qui aurait été rempli si les sables se ********* parallèlement au rivage.
Les transferts de Santa Marta vers les Bocas sont limités à la zone entre 0 et -5, donc certainement faibles.

Sauf pour la partie très proche au tamar oriental, les sondages et le relief de la côte sont pratiquement stables, on ne pourrait pas parler d'engraissement systématique entre 1908 et 1956. En ce qui concerne la partie à une plus faible distance du tamar, il y a eu un faible engraissement de 1935 à 1956, et un recul contre le tamar lui-même. Ce phénomène est explicable par le reversement du courant de la houle.

Ouest : À l'ouest, par contre, colossal amaigrissement des fonds dont la disparition de l'île Verde n'est qu'un exemple. Là, où en 1936, on trouvait 10 m, il y a aujourd'hui, 12 ou 13, 20 m, 30 à 60, 100 m, 150 m. Ces chiffres, sinon exacts, sont qualitativement valables.

Recul du cordon lagunaire : D'autre part, il y a eu aussi un recul du cordon lagunaire, qui devant La Playa, avait été formé par le dépôt d'alluvions du fleuve. Depuis 1936, la côte a reculé de 1400 m, près du tamar occidental (max. 1700), c'est-à-dire, à 2000 m à l'ouest des ouvrages, la plage a perdu approx. 400.000 m³ de sable par an et par km². Elle n'est aujourd'hui que faiblement alimentée ; 400.000 m³ serait donc l'apport nécessaire pour maintenir l'équilibre, apport qui était même dépassé avant la construction des ouvrages.

Interprétation : Les phénomènes de transfert semblent se limiter à un remaniement du stock sableux existant dont les modifications se font surtout et faiblement sur le profil.

Est : La côte est faiblement alimentée et présente un état sensiblement proche de la stabilité. Seule la partie proche aux ouvrages accuse un engraissement.

Ouest : À l'ouest, par contre, les transferts littoraux parallèles à la côte sont très intenses, le Rio Magdalena constituant une source d'apports très importante. En fait, l'équilibre dynamique de la côte a été modifié :

Plateau continental : a) Depuis deux cents années par le fait que le delta sous-marin du fleuve a atteint la limite du plateau continental (très étroite à cet endroit), avec une diminution des apports d'alluvions vers l'ouest par le versement de ceux-ci dans les grands fonds.

Diminution brutale des apports du fleuve : b) Depuis 30 années par la construction des ouvrages qui a provoqué, action de la canalisation, le rejet des alluvions vers les grands fonds. Ces alluvions ne sont plus disponibles pour la côte ouest que par l'effet du drift ; seule la partie supérieure de la barre peut être reprise par l'action de la houle et assurer l'alimentation de la plage.

Il est, en tout cas, **faux** de postuler que l'amaigrissement des fonds à l'ouest est dû au fait que les tamaras par leur face est (« dans le vent ») ont arrêté le cheminement du sable vers l'ouest.

Canyons dans le delta sous-marin.

Les conséquences de cette rupture de l'équilibre dynamique expliquent les modifications du trait de la côte et les effondrements successifs des matériaux déposés (effondrement de la barre à deux reprises). Il y a eu une formation, probablement sous l'effet de courants sous-marins de densité, **cte.**, des canyons importants dans le delta sous-marin. L'érosion atteint même jusqu'à l'isobathe - 20 ; ce ne peut pas donc être la houle, mais des glissements du plateau deltaïque.

Évolution des fonds du fleuve *****

Évolution de 4 sections 1936-55

***** la presqu'île Caiman. La forme de la section varie peu. Le chenal reste *****. La rive gauche. L'aire totale reste constante (*****) aux environs de 6500 m².

Vers le 5-6 (à la base du tajar oriental). La même allure générale de la section antérieure. Variations incohérentes d'aire (valeur moyenne : *****) *** de l'espolon de la rive droite. Formation vers 1950 d'un nouveau ***** contre la rive droite.

Construction de deux espolones 1948

Extrémité des tajaros. *** allure que la section antérieure avec un nouveau chenal contre la rive droite à partir de 1950. Ce phénomène s'explique par la construction en 1948 de deux espolones. À ce moment-là, les profondeurs ***** la rive droite étaient faibles, mais l'affouillement ***** et sur *** face *** des espolones ont produit l'érosion *****+ dans ces cas et la conséquente formation d'un chenal. ***** de l'obstacle construit par *** l'espolon.

Deux chenaux : Évolution des aires des sections 1 et 2

1935 (1 ^{er} effondrement de la barre)	1945 (2 ^e effondrement)	1948
(1) 9500 m ³ (réduction 6500 m ³ de l'aire	(réduction 6500 m ² 6200 ***** des	
(2) " entre 1936-45	7500 aires)	

Après 1947-48, augmentation lente due aux travaux vers une limite ***** située en 1956 à 7500 m².

Interprétation

Les effondrements de la barre sont accompagnés par des approfondissements généralisés qui s'étendent jusqu'à la section (4). Mais après le processus d'une ***** reprend d'autant plus vite que les sections sont proches

de la barre. À partir de 1947-48, la diminution du débouché linéaire provoque un approfondissement du lit et une augmentation de la section dus à une augmentation de la ***** (accroissement des vitesses au fond). En fait, les effets ***** d'une réduction du débouché linéaire tend toujours vers une limite (*****), car les pertes d'énergie ***** très rapidement. En théorie, en tout cas, le débouché linéaire peut toujours être réduit sans ***** (et sans inconvénient) à condition que l'aire de la section à l'embouchure soit plus grande que celle des sections en aval. C'est en quoi s'est inspiré d'ailleurs le projet de 1948 préconisant deux espolones.

Évolution des fonds de la barre

Déformation des lignes de niveau :	Les lignes de niveau devant l'embouchure sont déformées jusqu'à -200 m, mais la barre évolue peu au-delà de 100 m. Entre -20 et -100 m, les lignes de la barre forment des demi-cercles centrés sur Bocas -- formation du cône à section circulaire typique d'un cône de déjection fluviale.
Cône de déjection fluviale et canyons :	Une particularité est néanmoins à remarquer : indentation des lignes de niveau, les canyons dont l'importance sera éclairée plus tard. ` À moins de -20 m, les dépôts sont asymétriques avec une pente vers l'ouest très accentuée.
Petite barre et grande barre :	Nous appellerons la PETITE BARRE, du point de vue pratique, la plus importante, l'ensemble de dépôts de moins de 40 pieds et la GRANDE BARRE, l'ensemble de dépôts jusqu'à 100 m (elle inclut donc la petite barre).
Variation des volumes des dépôts :	1935-45, les dépôts pour une aire comprise entre 0 et -100 m ont été de 30 mill. de m³/an en moyenne. Vers 1941-42, il y a eu une diminution du volume des dépôts dont l'explication se trouve dans les canyons. En outre, après 1942, la moyenne annuelle des dépôts a monté de **** mill. de m³/an, ce qui correspond de près aux estimations du débit solide du fleuve.
Fonds de 0 à -20 :	0-10 : 2,3 mill. de m³/an en moyenne (1935-45) 0-20 : 10 mill. de m³/an en moyenne (1935-45)

Il y a eu amaigrissement de fonds entre 1935 et 1939 traduisant l'évolution des fonds à l'ouest du tamar occidental (ce que prouvent les plans de sondage pour la période).

Après 1945 : Le volume des dépôts après l'effondrement de 1945 reprend son allure d'avant pour les fonds 0-20.

Variation des aires des dépôts à l'embouchure : Les aires des dépôts devant l'embouchure pour des cotes supérieures à 20', 25' et 30' présentent un développement parallèle pour 1945-50.

1945, Disparition de la barre : Les dépôts sont totalement dispersés lorsqu'ils avaient atteint un développement considérable.

1945-50, Reconstitution des dépôts.

1954, Brusquement : nouvelle diminution des dépôts.

*** cela dû au fait que le ***** du tamar oriental *** en construction commençait à dépasser l'extrémité de l'ancien ouvrage disparu lors de l'effondrement de 1945. Il y a concomitance et probablement corrélation. Mais cela n'est sûrement **que dû à** la fermeture de la voie aux apports de l'est, plutôt, au fait qu'au fur et à mesure que le banc augmentait en volume, l'expansion des eaux diminuait : l'énergie fluviale se concentrait de plus en plus sur le banc stagnant devant l'embouchure et celui-ci se trouvait déplacé vers l'ouest, mais cette fois-là, non dispersé.

Aires des dépôts devant l'embouchure (-20') et à l'ouest du Taj. Occ.

Ceci est clairement démontré par la comparaison pour 1952-56 des aires de fonds à l'ouest du tamar occidental avec celles à l'ouest du tamar et devant l'embouchure. En fait, la croissance des aires des dépôts à -20', à l'ouest, était minime avant 1954, elle se développe à une allure exponentielle **depuis** cette époque ; tandis que la somme des dépôts (à l'ouest et devant Bocas) ne croît que linéairement et lentement (sans qu'il y ait rupture de pente). Il y a donc translation des sables devant l'embouchure vers l'ouest.

Origine des sables. Résumé

- a) Le fleuve apporte 125 mill. de m³/an de sédiments vers l'embouchure.
- b) La barre croît de 30 mill. de m³/an en moyenne et exceptionnellement de 120 mill. de m³/an.
- c) Les apports du vent sont négligeables.
- d) Il n'y a pas de courants marins qui puissent apporter des sables du large vers les petits fonds.
- e) Du fait de la direction incidente, les houles dominantes (NE) peuvent engendrer de l'est vers l'embouchure, mais, à priori, celui-ci est faible. L'existence du banc du Rio Viejo et la présence d'un canyon sur son flanc ouest confirment que si un tel transit existe, il est très faible.
- f) Les études sédimentologiques excluent la possibilité d'apports notables de l'est.

« La barre est constituée exclusivement, ou quasi, des sables d'origine fluviale ».

Mécanisme des dépôts. Formation de la barre

Sables roulés ou en saltation : Les sables roulés par le fleuve ou entraînés par saltation se déposent probablement en quasi-totalité, **où ils** franchissent l'extrémité des tamaras. Une partie, la plus lourde des éléments en suspension, s'y joint. Ils traversent assez rapidement la couche sous-adjacente d'eau de mer qui n'est que partiellement entraînée par le flux des eaux fluviales dont l'expansion est surtout superficielle. Ceci explique la reconstitution rapide de la barre après **1941** ; les apports par charriage auraient été insuffisants.

Éléments gros en suspension

Les sables en suspension, les plus fins, déposent symétriquement de part et d'autre de l'axe de l'embouchure à une distance proportionnelle à leur diamètre. Ils constituent un énorme cône de déjection fluviale devant Bocas, et le fait qu'il soit symétriquement disposé prouve qu'au-delà de -10 m n'intervient aucun facteur océanographique.

Ravinements et talus : **Le socle ou cône de déjection devant Bocas est parcouru par des ravinements, des talus et des canyons**, selon la direction de la plus grande pente jusqu'aux grands fonds. Des ravinements sont l'une des caractéristiques les plus importantes de Bocas de Ceniza.

La Petite barre : La petite barre, obstacle à la navigation, est constituée par la partie supérieure du cône de déjection ; elle est assez élevée pour être soumise à l'action de la mer. La houle du NE modèle des dépôts de la petite barre et les pousse vers l'ouest en leur donnant la forme soit d'une flèche dont le front est orienté NE-NO, soit d'un bourrelet ayant la même orientation. Mais, si le banc à l'ouest de Bocas est plus développé, cela ne se doit pas tellement aux effets de la houle, mais au fait que le courant du fleuve s'appuie surtout contre la rive droite.

Banc et plage à l'est : Les apports extérieurs au banc est de la barre sont, comme il a été déjà souligné, très faibles. L'engraissement léger de la plage à l'est des ouvrages prouve simplement que depuis l'aménagement de Bocas, il y a eu un remaniement des matériaux dans la plage est de sa partie orientale vers sa partie occidentale. Ce qui explique d'ailleurs la tendance du phénomène vers l'équilibre et l'érosion observée au voisinage immédiat du tamar oriental.

Effondrements de la barre :

Lorsque la barre atteint un certain développement, elle s'effondre et disparaît, fait qui s'est produit à deux reprises (1935 et 1945), ou au moins elle se trouve déplacée comme en 1954-56. **L'explication de ces effondrements, il faut la chercher dans les canyons.**

Conclusion : Position avantageuse

En général, on peut dire qu'en 1956, la majeure partie du débit solide était rejetée vers le large. Le développement poussé du delta sous-marin et l'étroitesse du plateau continental étaient favorables à l'avenir du port de Barranquilla, ainsi que l'orientation du chenal de sortie, car elle, celle *********. Mais cette orientation est catastrophique pour la côte ouest, soumise aux effets du drift E-O (est-ouest) et dépourvue des apports sableux du fleuve qui faisaient son équilibre. L'aménagement futur de cette région doit tenir compte de ce facteur déséquilibrateur. Surtout (**ou**) si les apports vers l'ouest semblaient en 1956, être plus réguliers, on ne peut pas être sûr que cela ne se fasse aux dépenses de la plage proche au tajar occidental, **qui elle continuait à represser rapidement.**

Physionomie de la petite barre.**Trois é- :**

Banc à relief accentué vers l'est.
Bourrelet parallèle aux crêtes de la houle (SE/N*).
Énorme banc à l'ouest dont le front présente une forte pente (NE/SO).

Le bourrelet : du point de vue pratique l'élément le plus important de la barre.
Lorsque l'on parle de franchir la barre, il s'agit en réalité de franchir le bourrelet.

Évolution du bourrelet. Aires des dépôts :

Pour le bourrelet, les aires des dépôts, à des profondeurs 20', 25' et 30', évoluent « en block » (courbes parallèles dans le temps), présentent 2 maxims aux saisons d'étiage, et deux minimas aux crues, mais n'ont aucune corrélation avec le vent ou la houle. Il est à remarquer qu'en 1955-57, les aires des dépôts du bourrelet continuaient à diminuer indiquant que l'équilibre n'était pas encore atteint.

Hauteur du bourrelet :

D'autre part, la hauteur du bourrelet, la profondeur maxima pour un tracé donné (M), n'est non plus en corrélation avec la force (vitesse) du vent, ni avec la hauteur de la houle sur la barre ou entre les tajamares, mais seulement avec les hauteurs d'eau, c'est-à-dire, avec le débit.

Conclusion :

« Les aires et la hauteur, donc les volumes des dépôts situés au nord et entre les tajamares, sont indépendantes du vent et de la houle et des fonctions inverses du débit du fleuve. »

Les canyons

Direction
Largeurs
Profondeur
Durée :
Canyon axial.
Causes de la
disparition de la
barre.

On a déjà parlé du canyon au flanc ouest du banc du Rio Viejo. Il y en a d'autres qui suivent la direction des lignes de courant et dont la largeur et la profondeur sont variables et la durée parfois éphémère (et qui) laissent en général des traces en forme de « cuvettes » ou « entonnoirs » sous-marins.

La position des canyons n'est ni fixe ni privilégiée, mais la plus fréquente est celle d'un profond canyon axial dans l'axe de l'embouchure à une certaine distance vers le large. Le canyon axial existait déjà en 1935, mais il serait difficile d'assister à sa naissance. En 1954, le canyon s'approche lentement de l'embouchure (point central joignant les extrêmes des tajamares) ; en 1955, presque pas d'évolution, et en 1956, le canyon axial s'approche rapidement à Bocas, jusqu'à 500 m, accélération qui expliquerait l'amaigrissement anormal de la petite barre à cette même époque. Nous nous rappelons aussi qu'en 1942, il y a eu un amaigrissement inexplicable de la barre ; et on constate que cet amaigrissement fut accompagné par la formation d'un grand nombre de canyons.

Les canyons sont, peut-être, la caractéristique la plus importante de Bocas de Ceniza. Le canyon axial est le principal, mais il existe aussi d'autres canyons affluents dont l'origine est mal connue. On pourrait ajouter que ces canyons ne s'observent que dans des mers non bordées par un plateau continental comme celle de Caraïbes.

La dynamique des canyons

Notions
générales
Formation des
canyons :

- a) Tout talus de sable présente un profil d'équilibre statique, fonction de la granulométrie des sédiments.
- b) Une force infiniment petite, un trouble quel***** *** déclencheur un ***** qui creuse un canyon (*****).
- c) Un canyon apparaît donc à la suite d'une rupture de l'équilibre ***** des dépôts constituant la barre.

Rupture de
l'équilibre,
causes :

Une telle rupture peut être causée :

- a) L'angle d'équilibre dynamique étant une fonction de la vitesse des courants (a : f [1/0], celui-ci diminue lorsque la vitesse augmente jusqu'au moment où l'équilibre est brisé. Ceci expliquerait pourquoi les canyons se forment suivant les lignes de courant.
- b) Par la croissance des dépôts qui augmentent la charge *****.
- c) Par l'ionisation des argiles qui composent une partie des sédiments. Les ions de *** peuvent être facilement échangés par Na (NaCl de la mer)

avec une modification profonde de la structure cristalline des dépôts et une diminution considérable de la *****.

En outre, les canyons sont ***** par des courants dirigés plutôt vers le large,

- a) courants de ***** transitoires qui parfois **révèlent** une intensité exceptionnelle qui donne lieu à des « avalanches » ; on les attribue aussi à la rupture des câbles sous-marins ;
tantôt vers la barre,
- b) courants froids de compensation constitués par l'eau de mer et qui peuvent être aussi permanents.
Elles aussi contribuent à la formation des canyons.

L'existence de canyons implique dans tous les cas une profonde instabilité des dépôts de la barre.

On peut expliquer les effondrements généralisés de 1936 et 1945 comme ayant les mêmes causes que les canyons.

L'explication **repérant** la diminution de la résistance mécanique due à la modification de la structure cristalline des dépôts est probablement la plus rationnelle pour la formation des canyons. Il n'y a en tout cas aucune corrélation entre les ruptures du câble sous-marin et l'apparition des canyons, et les mouvements sismiques (secousses, **cte**) dans la région. Une telle explication ne se conforme pas avec les faits.

-V-

Le modèle : Reproduction à échelle réduite des caractéristiques du fleuve et de son embouchure.

- a) Forme du lit
- b) Régime du fleuve
- c) Condition de propagation des marées
- d) Côte, 3,5 km vers l'est, 3 km vers l'ouest englobant ainsi largement les champs d'évolution de la barre.

Évidemment, l'échelle n'est pas la même dans toutes les directions étant donné certaines considérations pratiques et certaines simplifications possibles.

Par exemple :

Longueurs horizontales, 1 : 300

Longueurs verticales, 1 : 250

Temps, 1 : 24,5

Variables à régler :

- a) Marées
- b) Courants marins
- c) Houles
- d) Débits fluviaux (liquide et solide)
- e) Pente hydraulique
- f) Hauteurs d'eau
- g) Représentation des fonds mobiles (et leur évolution)
- h) Sédimentologie
- i) Champs des vitesses des courants.

Tarage du modèle :

Une fois les variables réglées, il faut, selon la méthode du L.C.H.F., les vérifier contre les conditions en nature pour assurer une véritable reproduction de rigueur scientifique.

Résultats des essais

- a) Prolongement du tamar occidental dans son axe. (Fig. 1, *49.)
Après une année : -5 m, barre dans l'axe de l'embouchure.
- b) Prolongement du tamar oriental dans son axe. (Fig. 2, *49.)
Le chenal s'établit préférentiellement contre le nouvel ouvrage (rive droite). Résultat médiocre.
- c) Prolongement du tamar oriental incurvé vers l'ouest. (Fig. 3, *49.)
Profond chenal s'appuyant contre l'ouvrage (rive droite) qui se forme presque immédiatement.
Après une année et demie : Dépôts rejetés vers l'ouest.
Affouillement à l'extrémité du prolongement, la houle provoque un approfondissement à l'est de la digue (dangereux).
Après 2 ans et demi : Au moins -10 m dans le chenal, mais sa forme rend la navigation difficile.
- d) Prolongement du tamar occidental incurvé vers l'est (fig. 4, *49.)
Après une année, la barre se forme dans le nouvel axe de l'embouchure.
- e) Calibrage de l'embouchure.
 - i) Réduction du débouché linéaire (largeur entre les digues) à 500 m.
Après deux ans, le chenal tend à se former contre la rive gauche, puis il se réadresse dans l'axe de l'embouchure coupant la barre en deux. On peut craindre que ce chenal quasi rectiligne ne soit pas instable.
 - ii) Réduction du débouché linéaire à 400 m. (Fig. 6, *49.)
Le chenal se forme sur la rive gauche, mais la coupure de la barre est moins ***** ; il y a toujours le bourrelet à franchir.
- f) Calibrage et incurvation vers l'ouest d'une digue à partir du tamar oriental.
 - i) Calibrage et incurvation. (Fig. 7, *49.)

Après deux ans, chenal contre la rive droite qui dépasse -10 m sur la barre.

ii) Prolongement de l'incurvation. (Fig. 8, *49.)

Après deux ans, résultats encore plus nets. Le chenal dépasse -12 m sans discontinuité.

g) Solutions sans intérêt pratique.

i) Prolongement simultané des deux tajaros. (dans leur axe et inc)

ii) Prolongement du tajar occidental vers l'ouest.

iii) Prolongement du tajar oriental vers l'est.

Remarque : Les essais furent faits sans les canyons, mais leur présence ne ferait qu'augmenter la marge de sécurité.

Analyse poussée de la meilleure solution trouvée dans les essais préliminaires.

Prolongement du tajar oriental incurvé vers l'ouest.

1 ½ année : Le chenal s'établit sur le côté ouest du nouvel ouvrage : -36' et même plus à l'extrémité de l'ouvrage.

3 années : Le chenal rejoint le canyon axial.

Creusement du lit, -40' au minimum dans le chenal.

4 années : La situation n'évolue plus, toujours -40'.

Le résultat ainsi obtenu est excellent, mais il pose un nouveau problème relatif au chenal fluvial.

Chenal fluvial : Les profondeurs dans le fleuve, une fois franchie la barre, dépassent 40' suivant d'abord le chenal dans la rive droite et ensuite, à partir de l'épi, 1 dans celui de la rive gauche jusqu'à Barranquilla.

Banc de 27' Avant Las Flores, les profondeurs sont égales ou supérieures à 40' et au-delà atteignent fréquemment 60', sauf pour un banc de 27' situé entre les deux chenaux.

Pour bénéficier de l'approfondissement à Bocas, il faut donc assurer la continuité de 40' entre la barre et Barranquilla.

Solution : Une telle continuité peut s'obtenir par des épis sagement placés de type agressif ou classique.

Par sa construction, un épi joue un rôle de déversoir ; les courants subissent sur sa crête une déviation et s'incurvent vers le fleuve. En amont comme en aval de l'épi, les vitesses sont ralenties dans l'ombre des ouvrages et il en résulte la formation de dépôts. Le chenal se trouve donc déplacé vers l'axe du fleuve.

Essais avec des épis

a) Épi agressif à 1,230 m de l'extrémité du tajar occidental. (Fig. 1, *52)

Par les effets de la houle qui gêne la formation de dépôts augmentant la turbulence en aval de l'ouvrage, les résultats s'avèrent moins bons que

l'on ne pouvait s'atteindre. Néanmoins, le chenal se trouve déplacé vers la rive droite et le banc approfondit à -35'.

b) Épi classique, même position.

Le résultat est à peu près le même. Le choix entre les deux types d'épis est donc technique.

L'épi agressif nécessite un enracinement plus fort **quoique** moins de matériaux. L'épi classique a, d'autre part, l'avantage d'assurer une correction du fleuve par une action en profondeur agissant seulement sur le lit mineur, sans modifier la section du lit majeur et l'évacuation des crues.

Dragage :

Pour obtenir les 40' désirés, un chenal de 150 m de largeur et 40 de profondeur a été dragué dans le creusement du banc, puis le chenal tende à s'obstruer légèrement et un seuil de 38' apparaît.

c) Épi classique à 1730 m. (Fig. 4, *52)

d) Épi classique à 2930 m. (Fig. 5, *52)

Résultats moins bons, les épis sont d'autant plus efficaces qu'ils sont implantés plus en aval.

Difficultés dans la construction d'un prolongement du tamar oriental incurvé vers l'ouest.

Ouvrage très robuste :

Celle-ci est sans doute la meilleure solution possible du point de vue hydraulique, mais sa construction offre quelques problèmes d'ordre technique. Le prolongement du tamar oriental, terminé en 1954, était déjà insuffisamment stable. Or, un prolongement d'encore **400*** m serait soumis vers l'est aux houles parfois violentes, vers l'ouest à une érosion menaçante et dans son extrémité, à l'instabilité des fonds due à la proximité du canyon axial. L'ouvrage impliquerait la mise en chantier des moyens particulièrement puissants, plus puissants que ceux utilisés jusqu'à maintenant à Bocas, car il devra être très robuste.

Solution :

Pour diminuer le cube de matériaux à mettre en œuvre, on pourrait envisager une construction émergente à son origine (dans l'extrémité actuelle du tamar oriental), et avec un profil plongeant jusqu'à son extrémité ; la houle captée serait moindre, et l'érosion fluviale moins intense, en particulière lors de crues, car l'expansion des eaux ne serait pas empêchée.

Essais :

En modèle réduit, un ouvrage de ce type donne les résultats :

Après deux années : La houle déferlant sur la digue entraîne des sables qui se déposent du côté du fleuve, le chenal se trouve déplacé vers l'axe du fleuve. Il y a augmentation de l'affouillement au pied des épis de la rive droite. Profondeur : - 38'.

Après 4 années : Les tendances s'accroissent. Le résultat est aussi bon qu'avec la digue du type émergente.

Remarque : Étant donné la nature des essais, il fut impossible de tarer les résultats, mais ils sont, qualitativement au moins, valables.

Sur la barre

Effet de l'utilisation des épis

Si des épis peuvent être employés pour un creusement du lit pourquoi ne pas les utiliser pour obtenir le même résultat sur la barre elle-même ? Ils ont l'avantage de la simplicité et du moindre coût ; judicieusement placés, ils pourraient servir à obtenir des résultats au moins provisoires, car on pourrait :

- a) Transformer les deux chenaux en un seul, situation nettement meilleure du point de vue hydraulique.
- b) Accentuer certaines tendances favorables de l'évolution de l'embouchure :
 - i) que la section entre les tajamares semble encore augmenter.
 - ii) que l'importance du bourrelet de la petite barre diminue.
 - iii) que le canyon tend à se rapprocher de l'embouchure et/ou s'élargir.
- c) Éloigner le plus rapidement possible le chenal de la rive droite des ouvrages dont la stabilité est déjà médiocre.

Essais avec des épis :

- a) Jonction de deux chenaux par deux épis classiques perpendiculaires à l'axe du fleuve à 6 km de l'embouchure (passage axial 400 m). Formation immédiate d'un chenal (-35') qui coupe le bourrelet et rejoint le canyon. Le « gain » est notable en dépit des pertes élevées d'énergie qui entraîne un procédé trop brutal.
- b) Essais avec différents types d'épis implantés dans la rive droite au premier espolón (agressif) et dans la rive gauche à différentes positions. Les résultats sont excellents, surtout si l'épi dans la rive gauche (classique ou agressif) n'est qu'à 200 m de l'extrémité du tamar. Il y a creusement de la barre et fonds de -35 à -40'.

Il est, néanmoins, à remarquer que la réalisation des épis agressifs pourrait présenter des difficultés étant donné que leur construction n'a été jamais entreprise en Colombie.

Traducción al español de la transcripción en francés elaborada por la Dra. Myriam Cabrales al español, realizada en forma automática utilizando el programa office Word 365 y corregido posteriormente por Nadim Arrieta López.

Contenido

1. Características generales del río	62
Longitud.	62
Tributarios.	62
Superficie de la Cuenca.	62
Cuesta:	62
Régimen de inundaciones:	62
Caudal (líquido):	62
Valle geológico:.....	63
Geología Parte Marítima:	63
El lecho de Barranquilla al mar:.....	63
Acceso al río.....	64
Mapa Mosquera:	64
Evolución favorable:	64
Puerto Colombia:.....	64
Primeros estudios:.....	64
Inicio de los trabajos:.....	65
Obras de la Winston:	65
Canal:	65
Colapso de la barra:.....	65
Reconstitución de la barra:.....	65
2. Bocas de Ceniza y el pueblo de Barranquilla. El entorno humano	66
El pasado:.....	66
El futuro:	66
3. La naturaleza de la desembocadura	67
Régimen de mareas: débiles en la región	67
Bajas en la región:	67
Sin inversión de corrientes:	67
Amortiguación:.....	67
Régimen de corrientes marinas.....	68
Permanentes:.....	68
Debido a la marea	68

En el oleaje:	68
El viento.....	68
Régimen de oleaje	68
Oleaje dominante:.....	68
Penetración:	68
Corrientes:	68
Asimetría significativa:	69
Régimen eólico	69
Vientos dominantes:	69
Corrientes	69
Aportes de arena	69
Caudales y alturas de agua en el Río Magdalena	69
La altura varía linealmente con el caudal	69
Costa afuera	69
Pendientes hidráulicos y rugosidades de fondo.....	69
Recuperación y calibración de energía:.....	70
Caudales sólidos de los ríos	70
Nociones:	70
Suspensión:	70
Variaciones en las concentraciones:	70
Saltación y rodamiento:	70
Caudal sólido total: para un caudal medio de líquido de 6000 m ³ /s	70
Naturaleza del flujo sólido:	71
Corriente del río; expansión del agua; campos de velocidad	71
Expansión:	71
Decantación al este:	71
Sedimentología.....	71
Análisis granulométricos, conclusiones:.....	71
Minerales pesados, conclusiones:	71
Morfología del litoral.....	72
Plataforma continental:.....	72
Este:	72
La costa:.....	72

Morfología submarina:	72
Oeste. Morfología submarina:.....	72
La costa:.....	72
Cambios recientes en la costa	73
Este: Cañón del Banco río Viejo, Isla Verde Sin importancia *****	73
Reforma de la playa:.....	73
Evolución de los fondos (a ambos lados de la boca sin la evolución de la propia barra).	73
Este: Cañón del Banco río Viejo	73
Oeste:	74
Retiro del cordón de la laguna:.....	74
Interpretación este:	74
Oeste:	74
Meseta continental:.....	74
Disminución brutal en las contribuciones del río:	74
Cañones en el delta submarino.	74
Evolución de los fondos de los ríos *****	75
Evolución de 4 secciones 1936-55	75
Construcción de dos espolones 1948.....	75
Dos canales: Evolución de las áreas de las secciones 1 y 2	75
Interpretación.....	75
Evolución de los fondos de la barra	76
Deformación de líneas de nivel:	76
Cono de lodo de río y cañones:	76
Barra pequeña y barra grande:.....	76
Cambio en los volúmenes de depósito:	76
Fondos de 0 a -20:	76
Después de 1945:.....	76
Variación en las áreas de depósito en la boca:	76
Zonas de depósito delante de la desembocadura (-20') y al oeste del Taj. Occ.	77
Origen de las arenas. Resumen	77
Mecanismo de depósito. Formación de la barra.....	77
Arenas rodadas o en saltación:	77

Gruesos elementos suspendidos	77
Barrancos y terraplenes:	78
La pequeña barra:	78
Banco y playa al este:	78
La barra se colapsa:	78
Conclusión: Posición ventajosa	78
Fisonomía de la pequeña barra.	79
Tres “e-“:	79
Evolución de la protuberancia o bajo. Áreas de depósito:	79
Altura de la perla:	79
Conclusión:	79
Cañones	79
Dirección. Ancho. Profundidad. Duración:	79
Cañón axial. Causas de la desaparición de la barra.	79
Dinámica de los cañones	80
Conceptos generales Formación de cañones:	80
Ruptura del equilibrio, causas:	80
El modelo:	81
Variables a establecer:	81
Configuración del modelo:	81
Resultados de las pruebas	81
Análisis en profundidad de la mejor solución encontrada en las pruebas preliminares.	82
Extensión del tajamar oriental curvo hacia el oeste.	82
Cauce del río:	83
Banco de 27'	83
Solución:	83
Pruebas con espolones curvos	83
Dragado:	83
Dificultades en la construcción de una extensión del tajamar oriental con punta curvada hacia el oeste.	84
Estructura muy robusta:	84
Solución:	84

Pruebas:	84
En la barra. Efecto del uso de los espolones curvos.....	84
Pruebas con espolones curvos:	85

Bocas de Ceniza o el manejo de la desembocadura del Río Magdalena.

R. E. Segovia

París, 19 de febrero de 1962

-I-

1. Características generales del río

Longitud.

1532 km, de los cuales aproximadamente 1300 son navegables.

Barranquilla-Magangué 4 metros de calado.

Magangué-Honda (rápidos a 947 km) 1,5 m calado.

(El caudal no es insuficiente para la navegación hasta antes de Honda en este curso medio sólo en las aguas bajas de enero, febrero y marzo gracias a las numerosas lagunas que sirven de cuenca reguladora. Extensión aproximada de 2200 km² que se llenan en el momento de las inundaciones y se vacían en aguas bajas). Más allá de Honda, navegación con calado variable según la altura de las aguas.

Tributarios.

42 de mayor o menor importancia. 23 en la margen izquierda incluyendo el Cauca, el más importante a 322 km del mar (sin grandes afluentes después) y 19 en la margen derecha. No hay afluentes entre Yuca y el mar.

Superficie de la Cuenca.

440.000 km², callejón entre las Cordilleras Central y Oriental

Cuesta:

Su nacimiento está a 4.270 m.

Fuente-Purificación. Régimen torrencial entre 2 y 6/1000.

Purificación-Río Carare. Caudal medio: 2 a 0,04/100.

R. Carare-mar. Curso bajo: 0,39 y 0.04/1000.

Régimen de inundaciones:

Las inundaciones siguen a las lluvias. Dos estaciones lluviosas:

Mayo – julio (máx. julio).

Octubre-diciembre (máx. nov., siendo este último el más alto).

Aguas bajas: marzo-abril.

Diferencia de alturas entre aguas bajas y altas en:

Girardot: 9 m (11 m durante crecientes muy altas).

Dorada : 5-6 m.

Calamar: 6 m (durante crecientes muy fuertes, las aguas se extienden en la llanura).

Caudal (líquido):

En 1956 (año considerado como promedio) 260 330 000 m³/año.

El aporte del Cauca aumenta el caudal en un 60 a 80% y después de este punto, el caudal sigue siendo esencialmente el mismo hacia el mar.

Valle geológico:

Colapso terciario tras el levantamiento de la Cordillera Oriental. Cubierto por el mar en el cretácico. Varias transgresiones, la última en el cretácico superior.

Tras la retirada del mar y la elevación de la costa, valle constituido por formaciones sedimentarias (arenisca, pudinga de canto rodado, sedimentos volcánicos y escombros de origen glaciar).

Geología Parte Marítima:

Desde Calamar:

Margen izquierda: rocas sedimentarias de origen marino (Eoceno).

El Canal del Dique era probablemente sólo un antiguo brazo de la desembocadura (delta), siendo el actual Departamento del Atlántico sólo una isla conectada al continente por los depósitos del río. Las antiguas dunas y ciénagas en la cuenca del canal refuerzan esta idea. El Canal del Dique que conecta Cartagena con el Magdalena tiende a sedimentarse con cada creciente y allí se debe mantener una draga.

Margen derecha: meseta de formación deltaica. Brazos muertos que desembocan en las ciénagas, la más importante de los cuales, Ciénaga Grande, probablemente formaba parte del antiguo estuario y ahora está separado del mar por un estrecho cordón de arena. La Boca del Río Viejo, al final de este cordón de arena, fue probablemente, hace más de dos siglos, la salida al mar desde el brazo principal del río. Hoy en día, el acceso a través de esta boca es casi imposible, pero el canal Barranquilla – Ciénaga se une a parte de este antiguo brazo.

Entre el río y la Ciénaga Grande, el bosque está inundado. El pantano absorbe una parte significativa de las aguas del río. Sin embargo, estas pérdidas parecen ser compensadas por los insumos locales, ya que el flujo en Barranquilla es aproximadamente igual al de Calamar.

El lecho de Barranquilla al mar:

Longitud del lecho entre las líneas de nivel -6 m: 700 m y varía poco (hay una sección más estrecha pocas aguas abajo de Las Flores: 640 m).

Sección mojada (Barranquilla-mar): 7000 m² y varía poco.

Lecho menor: Terminal -km 4 : margen izquierda

Km 4 – Km 8: margen derecha

Km 8 - desembocadura: margen izquierda (el canal en la margen derecha también tiene cierta importancia).

Fondo: Probablemente rocoso. Coral a lo largo de los muelles de la terminal. Pero el lecho es en general arenoso y muy irregular. Numerosas arrugas en la superficie del lecho, siendo algunas dunas de varios metros de altura. Más arriba, en el curso medio, aparecen enormes bancos de arena en el momento de las aguas bajas que cambian de forma

continuamente; son ellos los que alimentan la barra en la boca (y son un obstáculo formidable para la navegación).

Acceso al río.

El acceso al mar por las Bocas siempre ha sido difícil. Durante la época colonial, el Magdalena era la única ruta hacia el interior del país (esto sigue siendo cierto), pero el comercio con la metrópoli no era a través de Barranquilla, un pequeño pueblo entonces sin importancia, sino a través de Cartagena, una bahía de aguas profundas y punto de parada para convoyes. Desde Cartagena hasta el río, viajeros y comerciantes tomaron el Canal del Dique, ya utilizado en el siglo XVI y sujeto a desarrollo en el XVII. Este camino nunca ha sido completamente abandonado. Entre 1923 y 1929 se llevaron a cabo importantes trabajos de dragado, que continúan en la actualidad, pero los resultados fueron bastante decepcionantes.

Además, un ferrocarril conectó Cartagena con Calamar en 1894.

Mapa Mosquera:

Un mapa que data de 1849 muestra que, en ese momento, la boca del Magdalena tenía una posición nada cercana a la actual. Al oeste de Las Bocas había una serie de islas que congestionaban la desembocadura, pero protegían el pequeño puerto de Sabanilla, un enlace entre Barranquilla y el mar.

Evolución favorable:

A partir de 1850, se amplía naturalmente la barra de Bocas permitiendo la navegación a Barranquilla a embarcaciones de 7,50 de calado. El tonelaje anual alcanza las 23.000 en promedio. Sin embargo, en 1884, el tráfico fue nuevamente interrumpido debido a accidentes. La barra se reforma, y en 1884, solo hay 4-5 m (13-14') de fondo. Sabanilla vuelve a ser el puerto, conectado a Barranquilla por un ferrocarril.

Puerto Colombia:

Unos años más tarde, las islas al oeste de la desembocadura desaparecieron formando en su lugar una larga aguja de arena que culminó en la Isla Verde (norte de Punta Hermosa). A la sombra de esta bahía, Puerto Colombia, a pocos kilómetros al oeste de Sabanilla, se convierte en el puerto con un gran muelle modernamente equipado y también conectado a Barranquilla por un ferrocarril.

Primeros estudios:

A principios de este siglo, Barranquilla obtuvo su independencia política de Cartagena con la creación del Departamento del Atlántico del cual es capital. La agitación a favor de la canalización de Bocas toma forma y la presión política da origen a los primeros estudios: 1907, Lewis Haupt: las arenas de la barra tienen un origen marítimo procedente del este. 1914, Julius Berger: levantamiento cartográfico o topográfico del río y consulta sobre las Bocas. Confirmación de la existencia de una corriente marina del este. 1920, Black McKenney & Steward: Proyecto con dos tajamares paralelos perpendiculares a la corriente costera. La distancia entre las estructuras correspondería al radio hidráulico teórico para un caudal máximo y una profundidad de 30' (700 m). Pero para evitar

accidentes (especialmente durante las crecientes altas), se adoptó un radio de 877,6 m, acordando reducirlo aún más (por espolones) si la distancia elegida resultaba insuficiente.

Inicio de los trabajos:

1924-1930. Ulen & Co.

1934. Reanudación de los trabajos por la Winston Co.

Obras de la Winston:

Dique Boyacá (Las Flores hasta Cabo Augusta): Tenía por objeto:

- c) Aislar el cauce del río de las "ciénagas" de Mallorquín y Cantagallo que absorbieron una parte significativa del caudal del río; y
- d) proteger la margen izquierda contra la fuerte erosión causada por las corrientes y la curvatura del río.

Construcción: Piedra de cantera depositada en perfil trapezoidal, ferrocarril, y 4 espolones entre los kilómetros 2 y 6 como protección contra la erosión.

Tajamar (rompeolas) Occidental: Extensión del Dique Boyacá y en la misma dirección que éste (347°). Tiene una estructura en pilotes de madera y una escollera de piedra caliza configurada (también de forma trapezoidal) por oleada. El ferrocarril del dique también se extiende sobre el tajamar. 1.600 m construidos entre abril y septiembre de 1934.

Tajamar Oriental: También se extiende un dique similar al de la margen izquierda (aunque este dique y su ferrocarril no siguen una línea recta, sino la orilla de la Ciénaga de la Punta Faro). 800 m construidos entre enero y junio de 1935.

Canal:

En enero de 1935, la barra se ensanchó dando lugar a un pequeño canal de 10 m estrecho e irregular.

Colapso de la barra:

El 29 de agosto de 1935, 430 m del tajamar occidental se derrumbaron y la barra de la boca dejó de existir. La formación de un canal de 30 m de profundidad sigue a la desaparición de unos 30 millones de toneladas (t) de arena acarreadas hacia el mar. La avalancha dañó el cable submarino Puerto Colombia-Maracaibo, a 30 km de la costa.

El 7 de diciembre de 1935, 54 m del tajamar desaparecieron de nuevo. En todo caso, el problema de Bocas de Ceniza parece resuelto y Barranquilla aseguró el acceso directo al mar. Pero...

Reconstitución de la barra:

De 1940 a 1941, la barra comenzó a expandirse y los fondos disminuyeron. Consultaron a Bent, quien, tras un breve reconocimiento de la boca, propuso en marzo de 1945 una contracción de la misma.

Poco legible*****

-III-

2. Bocas de Ceniza y el pueblo de Barranquilla. El entorno humano

El pasado:

"El Río Magdalena es históricamente el primer y más bello camino de los colombianos", y Barranquilla debe su ascenso a esta verdad geográfica. Ni siquiera sabemos la fecha exacta de la fundación de la ciudad; el comienzo del XVIII es probablemente una buena aproximación.¹ A lo largo de la época colonial, Barranquilla permaneció bajo la sombra de Santa Marta y especialmente de Cartagena, puertos que dominaban la costa atlántica colombiana. El verdadero empuje de la ciudad no comenzó hasta 1823 con la introducción de barcos de vapor en el río; lentamente desplazó a sus rivales. Esta tendencia se acentúa aún más con la evolución favorable de las Bocas y con la expansión del comercio internacional. La creación del Departamento del Atlántico no hace más que confirmar este hecho. Sin embargo, en 1910, Barranquilla tenía sólo 30.000 habitantes.

50 años después, la ciudad tiene 500.000 habitantes. El crecimiento acelerado se remonta al colapso de la barra en 1935 que hizo de Bocas de Ceniza una extensión de Barranquilla en el mar. Hoy en día, gracias a la industria, la actividad económica de la ciudad supera con creces la actividad del puerto, pero desprovista de un rico interior este puerto sigue siendo la clave de la expansión y la prosperidad.

El futuro:

Sin embargo, por primera vez en este siglo, el puerto de Barranquilla se encontrará frente a un serio competidor. El Ferrocarril del Magdalena que conecta Bogotá con Santa Marta acaba de ser terminado. El río pierde su monopolio de 4 siglos. Entre 1950 y 1952, el tráfico en el río representó el 24% de las ton/km transportadas en el país; desde entonces, solo por la competencia de las carreteras y el puerto de Buenaventura (Pacífico), el porcentaje ha disminuido.

Según las previsiones, el ferrocarril le quitará al río el 20-30% del tráfico en el curso inferior y el 80% en el curso medio. Dado que la navegación en el curso medio consiste en

¹ Es posible que debido a su excelente localización para la pesca y las comunicaciones, Barranquilla haya, sido primero un pueblo indígena que sencillamente creció con la llegada de colonos españoles.

la mayor parte del enlace barranquillero con los principales centros de consumo del interior del país, la segunda cifra podría ser catastrófica. Para hacer frente a esta amenaza, las compañías navieras están presionando por el desarrollo del río y la modernización de los puertos; con una racionalización del transporte, el río seguirá siendo, al menos, para ciertos tipos de mercancías, el transporte más económico.

Por otro lado, se está construyendo un ramal que conecta Barranquilla con el ferrocarril del Magdalena. Por lo tanto, no se desviará todo el tráfico hacia Santa Marta, especialmente porque Barranquilla tiene a su favor el peso de la población: 500.000 habitantes contra 50.000 habitantes de Santa Marta. El puerto, en las condiciones actuales, está condenado. El futuro de la ciudad depende de la gestión de Bocas de Ceniza, de la solución definitiva del problema. Aquí está el resumen de los estudios realizados por el L.C.H. F. para poner el entorno natural al servicio de una ciudad y de un país.

- IV -

3. La naturaleza de la desembocadura

El estudio de las condiciones en la desembocadura del río Magdalena lleva a la respuesta a una pregunta crucial desde un punto de vista práctico: ¿Por qué se forma la barra?

La investigación oceanográfica, hidrográfica y sedimentológica nos da el origen de la barra y es el preámbulo de la respuesta a una segunda y aún más importante pregunta: ¿Qué se puede hacer para deshacerse de ella?

Examinaremos este segundo enfoque más adelante, si el tiempo lo permite, de acuerdo con los métodos de modelo a escala utilizados por el L.C.H.F.

Régimen de mareas: débiles en la región

Bajas en la región:

Son de baja amplitud en Bocas, rara vez superan los 0,50 m. No parecen generar corrientes a lo largo de la costa.

En condiciones excepcionales, una ola muy débil se siente en Calamar, 90 km río arriba.

Sin inversión de corrientes:

No hay inversión de corrientes, sino simplemente sobre elevación del volumen de agua almacenada en la boca. A veces ha habido un flujo de corriente hacia el fondo (llevando NaCl [cloruro de sodio] hasta Barranquilla superior a lo normal), pero este fenómeno es raro.

Amortiguación:

En marea alta, la amortiguación es del orden del 30%; la marea creciente simplemente resulta en una desaceleración de la corriente.

La energía de la marea se mantiene, en todos los casos, baja en comparación con la del río (4-15% dependiendo del caudal). «No hay necesidad de especular sobre su uso para modificar, en la dirección buscada, el régimen de la desembocadura.»

Régimen de corrientes marinas.

Permanentes:

Las corrientes marinas permanentes que se extienden a grandes masas de agua observables lejos de la costa, como, por ejemplo, la Corriente del Golfo, no se observa frente a Bocas, ninguna que influya en todo caso en el régimen de la desembocadura.

Debido a la marea

Mareas: como ya se ha visto, es decir, no hay grandes desplazamientos de masas de agua que cambien de dirección; -este es su carácter específico- durante las reversiones.

En el oleaje:

Oleaje: Corrientes debidas a la expansión lateral del oleaje entre la zona de rotura y la protuberancia (o bajos de la barra) y cuya fuerza es en función de la energía del oleaje y del ángulo de las crestas a la orilla. (Ver régimen de oleaje)

El viento

Vientos: Corrientes superficiales que pueden dar lugar a corrientes de compensación en el fondo, generadas cuando el viento sopla en una dirección determinada el tiempo suficiente. (Ver régimen eólico.)

Régimen de oleaje

Oleaje dominante:

Sentido: proveniente de NNE (norte-noreste) -NE (noreste).

Período: 5 a 8 segundos (máx.)

Amplitud: 3 m (en la barra)

También hay a veces un oleaje proveniente del N (norte) o NO (noroeste), menos arqueado y cuya amplitud es aproximada de 10 m.

Penetración:

Todas las olas penetran en el río, siendo la distancia una función del caudal del río en su momento, normalmente hasta la península Punta Caimán.

Corrientes:

El estudio de la propagación del oleaje desde mar abierto hasta la costa permite entender la distribución de la energía y predecir la aparición de corrientes.

Este: Casi no hay corrientes de oleaje al este de la desembocadura, o muy débiles en dirección este-oeste, a excepción del oleaje que se acerca al tajamar oriental, el cual tiene una incidencia inversa de la anterior y que puede dar lugar a corrientes NS (norte-sur) en las proximidades de la estructura.

Oeste: Aquí, al contrario, la incidencia del oleaje es muy fuerte generando corrientes de oleaje significativas.

Asimetría significativa:

Para el oleaje N o NO, la incidencia es obviamente diferente; en el oeste no hay corrientes, en el este, por la forma de la playa, la corriente generada siempre tendrá una dirección SO (suroeste), pero, aun así, menos fuerte.

Régimen eólico**Vientos dominantes:**

Dirección: procedente de NE-N-EN

Corrientes

Ellos pueden generar corrientes superficiales con sus correspondientes corrientes de compensación en el fondo.

Aportes de arena

Por lo tanto, desempeñan un papel en la evolución de las existencias arenosas, especialmente al este de Bocas. Pero sería un error suponer que el viento sea una de las principales causas de sedimentación de la boca. Según esta teoría, emitida por primera vez por Haupt, el viento traería arenas de los estrán secos (dunas al este de Bocas) al río o sobre la barra. Él veía la evidencia, y otros después de él, en el hecho de que el tajamar oriental y su ferrocarril a veces se vuelven arenosos. En realidad, como veremos más adelante, los aportes de viento son insignificantes en comparación con otras entradas del orden de 0,1 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ contra más de 100 millones de $\text{m}^3/\text{año}$. Sin embargo, sería de interés fijar las dunas al este con una vegetación adecuada.

Caudales y alturas de agua en el Río Magdalena**La altura varía linealmente con el caudal**

Los caudales y alturas de agua siguen el régimen de precipitaciones ya descrito. En Calamar registramos: máx. $12\,000\text{ m}^3/\text{s}$, mín. $2000\text{ m}^3/\text{s}$. el alto nivel de agua varía linealmente con el caudal (al menos en la parte marítima). La variación en los niveles de agua se ve igual en Barranquilla y Calamar (nuevamente evidencia de la debilidad de la marea baja). Una variación de $1000\text{ m}^3/\text{s}$ a $8000\text{ m}^3/\text{s}$ corresponde a approx. a una altura de 1 m.

Costa afuera

Por otro lado, en alta mar, el nivel es independiente del caudal y las variaciones solo se deben a la marea. Siendo débil ésta, el nivel promedio en alta mar es aproximadamente constante.

Pendientes hidráulicos y rugosidades de fondo

En la parte marítima, el talud hidráulico es una función directa del caudal. En Calamar, pasa de 0.64/1000 en agua alta a 0.4/1000 en agua baja y diferencias similares permanecen hasta la propia barra.

La pérdida de energía por la aspereza de los fondos no es muy grande en Bocas y es independiente del caudal.

Recuperación y calibración de energía:

Las disipaciones de energía en Bocas de Ceniza no parecen excesivas; la calibración de la boca no permitiría recuperar mucho; si se hace, debe concebirse racionalmente para modificar lo menos posible el régimen bastante **satisfactorio** desde el punto de vista energético.

Caudales sólidos de los ríos

Nociones:

El caudal sólido consiste en:

- c) Caudal sólido suspendido.
- d) Caudal sólido impulsado por saltación o rodamiento.

Suspensión:

El caudal sólido suspendido: La cantidad de sólidos suspendidos aumentan con la velocidad y la turbulencia, es decir, en el momento de las crecientes. En general: T_b : caudal sólido en suspensión/caudal del río.

Esta es una ley estadística limitada por diferencias a veces considerables. La principal desviación de la naturaleza variable de los materiales suspendidos. Sin embargo, estos materiales cambian a medida que las aguas suben, porque las primeras lluvias barren, en primer lugar, las arcillas y los elementos finos.

Variaciones en las concentraciones:

Para el Magdalena, por ejemplo, encontramos en octubre un gran porcentaje de elementos finos. Más tarde, el porcentaje de arena aumenta mientras que la concentración de materiales en suspensión disminuye; el aumento del caudal no se compensa con un aumento de la turbulencia, las pérdidas en suspensión debidas a arenas más pesadas.

Saltación y rodamiento:

Flujo sólido por saltación y rodamiento: este arrastre limitado a un espesor de 0,20 m por encima del lecho está entre el 10-20% del flujo suspendido, la relación no es constante, porque no dependen de las mismas variables; el caudal en suspensión tiende a disminuir a partir de un cierto nivel de agua, mientras que los acarreos en el fondo (rodamiento o por saltación) continúan creciendo con el caudal.

Caudal sólido total: para un caudal medio de líquido de 6000 m³/s

Mediante deducciones teóricas, llegamos a:

125.000.000 m³/año. Esta cifra se corresponde muy de cerca con la realidad; en 1947, el flujo sólido medido era de 120.000.000 m³ para un flujo líquido de 6000 m³ considerado promedio. Dicho transporte correspondería a una columna de 100 m de altura si se depositara en un kilómetro cuadrado.

Naturaleza del flujo sólido:

La parte más fina es un polvo que contiene mica y escombros de cuarzo con un diámetro de menos de 0,04 mm. Estos son, al parecer, precoloides que se depositan incluso antes de la floculación (un fenómeno relacionado con la presencia de iones marinos bivalentes).

Corriente del río; expansión del agua; campos de velocidad**Expansión:**

En la desembocadura, el río se extiende simétricamente a ambos lados de Bocas. Las aguas del río permanecen situadas bastante cerca de la superficie; una capa de agua de río se desliza sobre una base de agua de mar, dos fases muy diferentes, visibles a 15 o 20 km mar adentro y a 60 km durante las crecientes. La expansión hacia el este no es solo de unos pocos kilómetros (5), sino que hacia el oeste es casi ilimitada.

Decantación al este:

Es posible que, al este, las aguas del río, hasta 5 km, se asienten dando lugar a un banco de arenas finas, llevadas por el oleaje, puede volver a formar una pequeña fracción de los sedimentos de la barra. De hecho, hay, en el este, corrientes de oleaje que se extienden desde la rompiente hasta la orilla del estrán delantero, e incluso, corrientes de baja intensidad (0,5 m/s) entre el faro de Gómez y la desembocadura (excepto en el borde mismo del tajamar oriental donde la corriente se invierte).

Sedimentología**Análisis granulométricos, conclusiones:**

- e) La parte occidental de la barra tiene un tamaño de partícula relativamente grueso, cuya única fuente posible parece ser el río.
- f) La barra no puede ser alimentada por sedimentos del oeste, por el contrario, hay una transferencia de arena desde la barra hacia el oeste, hasta El Laguito (en Cartagena).
- g) Los depósitos ubicados en el este tienen un tamaño de partícula más fino; pueden -a priori- ser alimentados desde el oeste o el este.
- h) Frente al faro de Gómez, el stock existente no puede vincularse por evolución al de la barra:

La barra es alimentada por el río sin excluir por completo la posibilidad de débiles aportes en su flanco oriental.

Minerales pesados, conclusiones:

- d) Casi todos los materiales que abastecen la barra son de origen fluvial.
- e) La evolución actual de los depósitos ubicados al este de Bocas consiste en una reorganización del volumen existente que solo puede ser suministrado en proporciones diminutas por materiales del este.
- f) La influencia de los factores oceanográficos en el flanco oriental de la barra puede no ser despreciable con respecto a la clasificación y composición del tamaño de partícula de los elementos, pero ciertamente es una reelaboración en el perfil y no una transferencia costera de materiales.

Por lo tanto, esta acción es insignificante en la formación de la barra.

Morfología del litoral

Plataforma continental:

En esta región alrededor de Bocas, la plataforma continental tiene una pendiente muy pronunciada que alcanza y supera el 5%.

Este:

A la altura de Santa Marta, la isóbata -1000 está a 12 km de la costa y la isóbata -500 a 2 km y al este de la desembocadura, estas distancias están más o menos similares. Frente a Bocas, la isobata -1000 es de 18 km y -200 m se alcanzan a 5 km de los tajamares. La estrechez de la plataforma continental es notable.

La costa:

La costa en sí no ofrece singularidad. Entre Santa Marta y Ciénaga, está dominada por altos acantilados, flancos de la Sierra Nevada. Un largo cordón conecta Ciénaga con Bocas, la isla Salamanca que parece haber sido moldeada por oleajes frontales.

Morfología submarina:

Observamos la presencia de dos deformaciones de las líneas de nivel: una, frente a la Boca de Ciénaga, parece ser testigo de un antiguo brazo del río; la otra, frente a la Boca de Río Viejo, es probablemente una antigua barra de boca cuya meseta superior ha sido nivelada a -11 m. Se trata de dos terraplenes aluviales, el segundo de los cuales, de formación más reciente, es el más pequeño. Ambos son estables.

Oeste. Morfología submarina:

En el oeste, la morfología submarina es totalmente diferente. En la orilla, el cero batimétrico se corta (colgando de la costa como festones en un balcón) designando muchas pequeñas flechas de arena características de un considerable tránsito costero hacia el oeste. Hay tres deformaciones importantes: una emergente, la Isla Verde frente a Puerto Colombia, la columna vertebral del sistema; un enorme banco de arena, Bajío Zamba, entre Punta Galeras y Punta Piedras; y un banco final, el Banco de Playa Grande, frente a Cartagena. Los tres son inestables, y excepto, quizás el último, de las arenas del río, el aluvión del río Magdalena que migra a lo largo del continente (gigantescos “ripple marks”). Se sitúan entre las líneas de -17 y -20 m.

Cabe destacar que las playas tanto hacia Santa Marta como en Cartagena están conformadas por arenas grisáceas, de origen fluvial, de ahí el nombre de Bocas de Ceniza.

La costa:

Al oeste de Bocas se encuentra primero un cordón de 9 km que conecta la boca con Sabanilla detrás del cual lagunas protegen hoy, los antiguos acantilados de la erosión,

ubicados en la Playa. Sabanilla es una cabecera de meseta caliza y comienzo de una costa muy inestable que culmina en la muy inestable Isla Verde.

Cambios recientes en la costa

Este: Cañón del Banco río Viejo, Isla Verde

Sin importancia *****

desde 1935. No parece tener transporte *****

No legible.

Se ha calculado que de 1845 a 1935, 270 millones de toneladas de arena desaparecieron de Sabanilla, 3 millones por año.

Reforma de la playa:

Después de este desastre, en Salgar, se formó una playa que progresa rápidamente; 120 m de ancho entre octubre y diciembre de 1955. En Cartagena, hay estabilización, y en Puerto Colombia, se forma una nueva aguja más cerca de la costa, al final del antiguo muelle. Es obvio que la velocidad de formación de las playas solo puede explicarse si se admite la existencia, frente a esta costa, de enormes reservas móviles de materiales que se fijan solo temporalmente.

Evolución de los fondos (a ambos lados de la boca sin la evolución de la propia barra).

Este: Cañón del Banco río Viejo

Casi estable. El banco de Río Viejo no se mueve desde 1935. No parece tener un transporte sólido por parte de los fondos profundos o medios.

Hay, al oeste de la orilla, un cañón que se extiende hasta el batimétrico -5 que se habría llenado si las arenas caminaran de manera paralela a la orilla.

Los traslados de Santa Marta hacia las Bocas están limitados a la zona entre 0 y -5, por lo que ciertamente son bajos.

Salvo la parte muy próxima al tajamar oriental, los sondeos y el relieve de la costa son prácticamente estables, no se podría hablar de engorde sistemático entre 1908 y 1956. En lo que respecta a la parte a una distancia más corta del tajamar, hubo un ligero engorde de 1935 a 1956, y una retirada contra el propio tajamar. Este fenómeno puede explicarse por la inversión de la corriente del oleaje.

Oeste:

Al oeste, por otro lado, colosal adelgazamiento de fondos de la cual la desaparición de la Isla Verde es solo un ejemplo. Allí, donde en 1936, había 10 m, hay hoy, 12 o 13, 20 m, 30 a 60, 100 m, 150 m. Estas cifras, si no son exactas, son cualitativamente válidas.

Retiro del cordón de la laguna:

Por otro lado, también hubo un retroceso del cordón de la laguna, que, frente a La Playa, se había formado por el depósito de aluvión del río. Desde 1936, la costa ha retrocedido en 1400 m, cerca del tajamar occidental (máx. 1700), es decir, 2000 m al oeste de las obras, la playa ha perdido aprox. 400.000 m³ de arena por año y por km². Ahora solo está débilmente abastecido; 400.000 m³ serían, por lo tanto, la contribución necesaria para mantener el equilibrio, una contribución que incluso se superó antes de la construcción de las estructuras.

Interpretación este:

Los fenómenos de transferencia al este parecen limitarse a una reelaboración del stock arenoso existente cuyas modificaciones se realizan principal y débilmente en el perfil. La costa está mal alimentada y tiene un estado sustancialmente cercano a la estabilidad. Sólo la parte cercana a las obras muestra engrosamiento.

Oeste:

En el oeste, por otro lado, los traslados litorales paralelos a la costa son muy intensos, siendo el Río Magdalena una fuente muy importante de insumos. De hecho, el equilibrio dinámico de la costa ha sido modificado.

Meseta continental:

- a. Durante doscientos años por el hecho de que el delta submarino del río ha alcanzado el límite de la plataforma continental (muy estrecha en este punto), con una disminución de las contribuciones aluviales hacia el oeste por el vertido de estas hacia las profundidades marinas.

Disminución brutal en las contribuciones del río:

- b. Durante 30 años por la construcción de las obras que provocaron, por acción de la canalización, el vertido de aluvión a las profundidades marinas. Este aluvión ahora solo está disponible para la costa oeste por el efecto de la deriva; solo la parte superior de la barra puede ser tomada por la acción del oleaje y garantizar la alimentación de la playa.

Es, en cualquier caso, erróneo postular que la pérdida de peso de los fondos hacia el oeste se debe a que los tajamares por su cara este ("en el viento") han detenido el camino de la arena hacia el oeste.

Cañones en el delta submarino.

Las consecuencias de esta ruptura del equilibrio dinámico explican los cambios en la línea de la costa y los sucesivos colapsos de los materiales depositados (colapso de la barra dos

veces). Ha habido una formación, probablemente bajo el efecto de corrientes submarinas de densidad, etc., de importantes cañones en el delta submarino. La erosión llega incluso hasta la isóbata -20; por lo que no puede ser el oleaje, sino los deslizamientos de la meseta deltaica.

Evolución de los fondos de los ríos *****

Evolución de 4 secciones 1936-55

La península del Caimán. La forma de la sección varía poco. El canal sigue apoyado en la margen izquierda. El área total permanece constante (o casi) en alrededor de 6500 m². Alrededor del 5-6 (en la base del tajamar oriental). El mismo aspecto general de la sección anterior. Variaciones inconsistentes en el área (valor promedio: 7100 metros cuadrados *****) *** de la orilla derecha del espolón. Formación alrededor de 1950 de un nuevo canal contra la margen derecha.

Construcción de dos espolones 1948

Extremidad de los tajamares. Mismo aspecto que la sección anterior con un nuevo canal contra la margen derecha a partir de 1950. Este fenómeno se explica por la construcción en 1948 de dos espolones. En ese momento, las profundidades de la margen derecha eran bajas, pero el enfilamiento lateral y sobre la cara oriental de los espolones produjeron la erosión clásica en estos casos y la consiguiente formación de un canal construido por el espolón.

Dos canales: Evolución de las áreas de las secciones 1 y 2

1935 (1º colapso de la barra)	1945 (2º colapso) 1948
9500 m ³ (reducción 6500 m ³ del área)	(reducción 6500 m ² reducción 6200 de área
(2) del área entre 1936-45	reducción 7500 área)

Después de 1947-48, lento aumento debido al trabajo hacia un límite ***** ubicado en 1956 a 7500 m².

Interpretación

Los colapsos de la barra se acompañan de una profundización generalizada que se extiende hasta el tramo (4). Pero después del proceso de un elemento se reanuda aún más rápido ya que las secciones están cerca de la barra. A partir de 1947-48, la disminución de la salida lineal provocó una profundización del lecho y un aumento del tramo debido a un aumento de la potencia del acarreo (aumento de las velocidades subterráneas). De hecho, los efectos benéficos de una reducción en la salida lineal siempre tienden hacia un límite (****)* En teoría, en cualquier caso, la salida lineal siempre se puede reducir sin ***** (y sin inconvenientes) siempre que el área de la sección en la boca sea mayor que la de las secciones aguas abajo. Esto es lo que inspiró el proyecto de 1948 que abogaba por dos espolones.

Evolución de los fondos de la barra

Deformación de líneas de nivel:

Las líneas de nivel frente a la boca se deforman hasta -200 m, pero la barra evoluciona poco más allá de los 100 m.

Entre -20 y -100 m, las líneas de la barra forman semicírculos centrados en Bocas, formación del cono con una sección circular típica de un cono de un lodo fluvial

Cono de lodo de río y cañones:

Sin embargo, hay que notar una peculiaridad: agrietamiento de las líneas de nivel, los cañones cuya importancia se iluminará más adelante. `

A menos de -20 m, los depósitos son asimétricos con una pendiente muy pronunciada hacia el oeste.

Barra pequeña y barra grande:

Denominaremos la pequeña barra, desde el punto de vista práctico, el más importante, el conjunto de depósitos de menos de 40 pies y la barra grande, el conjunto de depósitos de hasta 100 m (por lo tanto, incluye la barra pequeña).

Cambio en los volúmenes de depósito:

1935-45, los depósitos para un área entre 0 y -100 m eran 30 millones de m^3 /año en promedio.

Alrededor de 1941-42, hubo una disminución en el volumen de depósitos cuya explicación se encuentra en los cañones. Además, después de 1942, el promedio anual de depósitos aumentó en 12 millones de m^3 /año, que corresponde estrechamente a las estimaciones del flujo sólido del río.

Fondos de 0 a -20:

0-10 : 2.3 millones de m^3 /año en promedio (1935-45)

0-20: 10 millones de m^3 /año en promedio (1935-45)

Hubo una disminución de profundidades entre 1935 y 1939 que refleja la evolución de los fondos al oeste del tajamar occidental (como lo demuestran los programas de sondeos para el período).

Después de 1945:

El volumen de depósitos después del colapso de 1945 volvió a su apariencia anterior para los fondos 0-20.

Variación en las áreas de depósito en la boca:

Las áreas de depósito frente a la boca para calificaciones superiores a 20', 25' y 30' muestran un desarrollo paralelo para 1945-50.

1945, Desaparición de la barra: Los depósitos están totalmente dispersos cuando habían alcanzado un desarrollo considerable.

1945-50, Reconstitución de depósitos.

1954, Abruptamente: nueva disminución de los depósitos.

Esto se debió al hecho del prolongamiento del tajamar oriental en construcción comenzaba a tomar el final de la antigua estructura que desapareció durante el colapso de 1945. Hay

concomitancia y probablemente correlación. Pero esto probablemente no se deba al cierre de la vía de entrada de las contribuciones del este, más bien, al hecho de que a medida que la orilla aumentaba de volumen, la expansión de las aguas disminuía: la energía del río se concentraba cada vez más en la orilla estancada frente a la desembocadura y se movía hacia el oeste, pero esta vez, no disperso, es decir, concentró su fuerza.

Zonas de depósito delante de la desembocadura (-20') y al oeste del Taj. Occ.

Esto se demuestra claramente por la comparación para 1952-56 de las áreas inferiores al oeste del tajamar occidental con las del oeste del tajamar delante de la boca. De hecho, el crecimiento de las áreas de depósito a -20' en el oeste era mínimo antes de 1954, ha estado creciendo a un ritmo exponencial desde ese momento; mientras que la suma de los depósitos (al oeste y frente a Bocas) está creciendo solo lineal y lentamente (sin ninguna ruptura en la pendiente). Por lo tanto, hay traslado de las arenas frente a la boca hacia el oeste.

Origen de las arenas. Resumen

- g) El río trae 125 millones de m³/ año de sedimento hacia la boca.
- h) La barra crece de 30 millones de m³/ año en promedio y excepcionalmente de 120 millones de m³/año.
- i) Los aportes del viento son insignificantes.
- j) No hay corrientes marinas que puedan traer arenas del mar a las aguas poco profundas.
- k) Debido a la dirección incidente, las olas dominantes (NE) pueden generarse desde el este hacia la boca, pero, a priori, son débiles.
La existencia del banco del Río Viejo y la presencia de un cañón en su flanco occidental confirman que si tal tránsito existe, es muy débil.
- l) Los estudios sedimentológicos excluyen la posibilidad de aportes significativos desde el este.
"La barra consiste exclusivamente, o casi exclusivamente, en arenas de origen fluvial".

Mecanismo de depósito. Formación de la barra

Arenas rodadas o en saltación:

Las arenas rodadas por el río o traídas por la saltación probablemente se depositan casi en su totalidad, donde cruzan el final de los tajamares.

Gruesos elementos suspendidos

Una parte, el más pesado de los elementos suspendidos, se deposita allí. Pasan con bastante rapidez a través de la cuña salina, que solo es parcialmente impactada por el flujo de las aguas del río, cuya expansión es principalmente superficial. Esto explica la rápida reconstitución de la barra después de 1941; las contribuciones por acarreo habrían sido insuficientes.

Las arenas suspendidas, las más finas, se depositan simétricamente a ambos lados del eje de la boca a una distancia proporcional a su diámetro. Constituyen un enorme cono de sedimentos fluviales frente a Bocas, y el hecho de que esté dispuesto simétricamente demuestra que más allá de -10 m no interviene ningún factor oceanográfico.

Barrancos y terraplenes:

La base o cono de sedimentos frente a Bocas es atravesada por barrancos, terraplenes y cañones, dependiendo de la dirección de la pendiente más grande a las profundidades del mar. Los barrancos (y sus cañones aledaños) son una de las características más importantes de Bocas de Ceniza.

La pequeña barra:

La pequeña barra, un obstáculo para la navegación, es la parte superior del cono de sedimentos; es lo suficientemente alta como para ser sometida a la acción del mar. El oleaje del NE modela los depósitos de la pequeña barra y los empuja hacia el oeste dándoles la forma de una flecha cuya frente está orientada NE-NO, o de una protuberancia (o bajos de la barra) que tiene la misma orientación. Pero, si la ribera al oeste de Bocas está más desarrollada, no se debe tanto a los efectos del oleaje, sino a que la corriente del río se arrima principalmente contra la margen derecha.

Banco y playa al este:

Las contribuciones externas al banco este de la barra son, como ya se ha señalado, muy bajas.

El ligero engrosamiento de la playa al este de las obras simplemente demuestra que, desde el desarrollo de Bocas, ha habido una reelaboración de materiales en la playa oriental desde su parte oriental hasta su parte occidental. Esto además explica la tendencia del fenómeno hacia el equilibrio y la erosión observada en las inmediaciones del tajamar oriental.

La barra se colapsa:

Cuando la barra alcanza un cierto desarrollo, se derrumba y desaparece, hecho que se ha producido dos veces (1935 y 1945), o al menos se desplaza como en 1954-56. **La explicación de estos colapsos hay que buscarla en los cañones.**

Conclusión: Posición ventajosa

En general, se puede decir que en 1956 la mayor parte del caudal sólido se descargaba hacia el mar. El avanzado desarrollo del delta submarino y la estrechez de la plataforma continental fueron favorables para el futuro del puerto de Barranquilla, al igual que la orientación del canal de salida, como lo fue la de pendiente máxima. Pero esta orientación es catastrófica para la costa oeste, sujeta a los efectos de la deriva E-O (este-oeste) y desprovista de las aportaciones arenosas del río que hacían su equilibrio. El desarrollo futuro de esta región debe tener en cuenta este factor de desequilibrio. Especialmente si las contribuciones al oeste parecían en 1956, ser más regulares, uno no puede estar seguro de que esto no se hiciera a expensas de la playa cercana en tajamar occidental, que continuó su rápida regresión y erosión.

Fisonomía de la pequeña barra.

Tres “e-“:

Banco con relieve acentuado hacia el este.

Protuberancia (o bajos de la barra) paralela a las crestas del oleaje (SE/N*).

Enorme banco al oeste con una pendiente pronunciada (NE-SO), frontal.

La protuberancia (o bajos de la barra): desde un punto de vista práctico es el elemento más importante de la barra. Cuando hablamos de cruzar la barra, en realidad se trata de cruzar la protuberancia (o bajos de la barra).

Evolución de la protuberancia o bajo. Áreas de depósito:

Para la protuberancia (o bajo de la barra) las áreas de los depósitos, a profundidades de 20', 25' y 30', evolucionan "en bloque" (curvas paralelas en el tiempo), tienen 2 máximos en las estaciones bajas y dos mínimos en las inundaciones, pero no tienen correlación con el viento o el oleaje. Cabe señalar que en 1955-57, las áreas de deposición de la protuberancia (o bajo) continuaron disminuyendo, lo que indica que aún no se había alcanzado el equilibrio.

Altura de la perla:

Por otro lado, la altura de la protuberancia (o bajo), la profundidad máxima para una parcela dada (M), tampoco está correlacionada con la fuerza (velocidad) del viento, ni con la altura del oleaje en la barra o entre los tajamares, sino solo con el nivel del agua, es decir, con el caudal del río.

Conclusión:

"Las áreas y la altura, y por lo tanto los volúmenes de los depósitos ubicados al norte y entre los tajamares, son independientes del viento y el oleaje y de las funciones inversas del caudal del río".

Cañones

Dirección. Ancho. Profundidad. Duración:

Ya hemos hablado del cañón en el flanco occidental del banco del Río Viejo. Hay otros que siguen la dirección de las líneas actuales y cuya anchura y profundidad son variables y la duración a veces efímera deja en general huellas en forma de "cuencos" o "embudos" submarinos.

Cañón axial. Causas de la desaparición de la barra.

La posición de los cañones no es fija ni privilegiada, pero la más frecuente es la de un profundo cañón axial en el eje de la boca a cierta distancia al mar. El cañón axial ya existía en 1935, pero sería difícil presenciar su nacimiento. En 1954, el cañón se acercó lentamente a la desembocadura (punto central que une los extremos de los tajamares); en 1955, casi sin evolución, y en 1956, el cañón axial se acercó rápidamente en Bocas, hasta 500 m, aceleración que explicaría adelgazamiento anormal de la pequeña barra al mismo tiempo.

También recordamos que en 1942 hubo un adelgazamiento inexplicable de la barra; y notamos que esta pérdida de peso fue acompañada por la formación de una gran cantidad de cañones. Los cañones son, quizás, la característica más importante de Bocas de Ceniza. El cañón axial es el principal, pero también hay otros cañones tributarios cuyo origen es poco conocido. Se podría agregar que estos cañones solo se observan en mares no bordeados por una plataforma continental como la del Caribe.

Dinámica de los cañones

Conceptos generales Formación de cañones:

- d) Cada pendiente de arena tiene un perfil de equilibrio estático, una función del tamaño de partícula del sedimento.
- e) Una fuerza infinitamente pequeña, un trastorno cualquiera puede desencadenar una avalancha que excave un cañón (la experiencia para el río Magdalena condujo varias veces a un modelo a escala reducido).
- f) Un cañón aparece, así como resultado de una ruptura del equilibrio de la maza de los depósitos que constituyen la barra.

Ruptura del equilibrio, causas:

Tal ruptura puede ser causada por:

- d) Dado que el ángulo de equilibrio dinámico es una función de la velocidad de las corrientes, disminuye cuando la velocidad aumenta hasta el momento en que se rompe el equilibrio. Esto explicaría por qué los cañones se forman a lo largo de las líneas actuales.
- e) Por el crecimiento de depósitos que aumentan la carga estática.
- f) Por la ionización de las arcillas que forman parte de los sedimentos. Los iones de sal pueden ser fácilmente intercambiados por Na (NaCl del mar) con un cambio profundo en la estructura cristalina de los depósitos y una disminución considerable en la resistencia mecánica.

Además, los cañones están recorridos por corrientes dirigidas más bien mar adentro,

- c) da lugar a "avalanchas"; también se atribuyen a la ruptura de cables submarinos; a veces hacia la barra,
 - d) corrientes frías de compensación constituidas por agua de mar y que también pueden ser permanentes.
- También contribuyen a la formación de cañones.

La existencia de cañones implica en todo caso una profunda inestabilidad de los depósitos de la barra.

Los colapsos generalizados de 1936 y 1945 pueden explicarse como teniendo las mismas causas que los cañones.

La explicación con respecto a la disminución de la resistencia mecánica debido a la modificación de la estructura cristalina de los depósitos es probablemente la más racional para la formación de cañones. En cualquier caso, no existe correlación entre las roturas del cable submarino y la aparición de cañones, y los movimientos sísmicos (temblores, etc.) en la región. Tal explicación no se ajusta a los hechos.

-IV-

El modelo:

Reproducción a escala reducida de las características del río y su desembocadura.

- e) Forma del lecho
- f) Régimen fluvial
- g) Condición de propagación de mareas
- h) Costa, 3,5 km al este, 3 km al oeste abarcando así en gran medida los campos de evolución de la barra.

Obviamente, la escala no es la misma en todas las direcciones dadas algunas consideraciones prácticas y algunas posibles simplificaciones.

Por ejemplo:

Longitudes horizontales, 1: 300

Longitudes verticales, 1: 250

Tiempo, 1: 24.5

Variables a establecer:

- j) Mareas
- k) Corrientes marinas
- l) Oleaje
- m) Caudales fluviales (líquidos y sólidos)
- n) Pendiente hidráulica
- o) Alturas del agua
- p) Representación de fondos móviles (y su evolución)
- q) Sedimentología
- r) Campos de velocidad de corriente.

Configuración del modelo:

Una vez asentadas las variables, es necesario, según el método de L.C.H.F., comprobar las condiciones naturales para asegurar una verdadera reproducción del rigor científico.

Resultados de las pruebas

- h) Extensión del tajamar occidental en su eje.

Después de un año: -5 m, barra en el eje de la boca.

- i) Extensión del tajamar oriental en su eje.

El canal se establece preferentemente frente a la nueva estructura (margen derecha).
Resultado mediocre.

- j) Extensión del tajamar oriental curvado hacia el oeste.
Canal profundo contra la estructura (margen derecha) que se forma casi de inmediato.
Después de un año y medio: Depósitos rechazados hacia el oeste.
Erosión al final de la extensión, el oleaje provoca una profundización al este del dique (peligroso).
Después de 2 años y medio: Al menos -10 m en el canal, pero su forma dificulta la navegación.
- k) Extensión del tajamar occidental curvada hacia el este
Después de un año, la barra se forma en el nuevo eje de la boca.
- l) Calibración de la desembocadura.
 - i) Reducción de una salida lineal (anchura entre los diques) a 500 m.
Después de dos años, el canal tiende a formarse contra la orilla izquierda, luego se redirige en el eje de la boca cortando la barra por la mitad. Se teme que este canal casi recto no sea inestable.
 - ii) Reducción de la salida lineal a 400 m.
El canal se forma en la orilla izquierda, pero el corte de la barra es menos neta; siempre queda la protuberancia (o bajo de la barra) para cruzar.
- m) Calibración y curva hacia el oeste de un dique desde el tajamar oriental.
 - i) Calibración y curva.
Después de dos años, canal contra la orilla derecha que supera los -10 m en la barra.
 - ii) Extensión de la curva.
Después de dos años, resultados aún más claros. El canal supera los -12 m sin discontinuidad.
- n) Soluciones sin interés práctico.
 - i) Prolongación simultánea de los dos tajamares. (en el eje e inc)
 - ii) Extensión del tajamar occidental hacia el oeste.
 - iii) Extensión del tajamar oriental hacia el este.

Nota: Las pruebas se realizaron sin los cañones, pero su presencia solo aumentaría el margen de seguridad.

Análisis en profundidad de la mejor solución encontrada en las pruebas preliminares.

Extensión del tajamar oriental curvo hacia el oeste.

1 año y medio: El canal se establece en el lado oeste de la nueva estructura: -36' y más aún al final de la obra.

3 años: El canal se une al cañón axial.

Excavación del lecho, -40' mínimo en el canal.

4 años: La situación ya no evoluciona, todavía -40'.

El resultado obtenido es excelente, pero plantea un nuevo problema relacionado con el cauce del río (o canal de navegación)

Cauce del río:

Las profundidades en el río, una vez cruzado y la barra, superan los 40' siguiendo primero el cauce en la margen derecha y luego, desde espolón curvo, 1 en la de la margen izquierda hasta Barranquilla.

Banco de 27'

Antes de Las Flores, las profundidades son iguales o superiores a 40' y más allá con frecuencia alcanzan los 60', a excepción de un banco de 27' ubicado entre los dos canales. Para beneficiarse de la profundización en Bocas, por lo tanto, es necesario asegurar la continuidad de 40' entre la barra y Barranquilla.

Dicha continuidad se puede obtener mediante espolones curvos sabiamente colocados de tipo agresivo o clásico.

Solución:

Por su construcción, un espolón curvo juega un papel de aliviadero; las corrientes sufren en su cresta una desviación y se curvan hacia el río. Aguas arriba y aguas abajo del espolón curvo, las velocidades se ralentizan a la sombra de las estructuras y esto resulta en la formación de depósitos. Por lo tanto, el canal se mueve hacia el eje del río.

Pruebas con espolones curvos

- e) Espolón curvo agresivo a 1.230 m del final del tajamar occidental.
Por los efectos del oleaje que dificulta la formación de depósitos aumentando la turbulencia aguas abajo de la estructura, los resultados son menos buenos de lo que se podría lograr. Sin embargo, el canal se mueve a la margen derecha y el banco se profundiza a -35'.
- f) Espolón curvo, misma posición.
El resultado es más o menos el mismo. Por lo tanto, la elección entre los dos tipos de espolones curvos es técnica.
El espolón curvo agresivo requiere un enraizamiento más fuerte, aunque menos material. El espolón curvo clásico tiene, por otro lado, la ventaja de asegurar una corrección del río mediante una acción profunda actuando solo sobre el lecho menor, sin modificar la sección del lecho mayor y la evacuación de inundaciones.

Dragado:

Para obtener los 40' deseados, se dragó un canal de 150 m de ancho y 40 m de profundidad en la excavación del banco, luego el canal tiende a obstruirse ligeramente y aparece un umbral de 38'.

- a) Espolón curvo clásico 1730 m.
 - b) Espolón curvo clásico 2930 m.
- Con menos buenos resultados, los espolones curvos son aún más efectivos a medida que se implantan más abajo.

Dificultades en la construcción de una extensión del tajamar oriental con punta curvada hacia el oeste.

Estructura muy robusta:

Esta es probablemente la mejor solución posible desde el punto de vista hidráulico, pero su construcción ofrece algunos problemas técnicos. La extensión del tajamar oriental, completada en 1954, a no era lo suficientemente estable. Sin embargo, una extensión de otros 400 m estaría sometida al este a oleajes a veces violentos, al oeste a una erosión amenazante y, en su final, a la inestabilidad de los fondos debido a la proximidad del cañón axial. La obra implicaría la construcción de medios particularmente potentes, con más potencia que los utilizados hasta ahora en Bocas, porque tendrá que ser muy robusto.

Solución:

Para reducir el cubo de materiales a utilizar, se podría prever una construcción emergente en su origen (en el extremo actual del tajamar oriental), y con un perfil hundido hasta su final; el oleaje capturado sería menor, y la erosión del río menos intensa, especialmente durante las crecientes, porque no se impediría la expansión de las aguas.

Pruebas:

En un modelo a escala, un trabajo de este tipo da los siguientes resultados:

Después de dos años: El oleaje que se rompió en el dique trajo arenas que se asientan en el lado del río, el canal se traslada al eje del río. Hay un aumento en el rastreo al pie de las orejas en la orilla derecha. Profundidad: -38'.

Después de 4 años: Las tendencias están aumentando. El resultado es tan bueno como con el tipo de terraplén.

Nota: Dada la naturaleza de los ensayos o pruebas, fue imposible calificar los resultados, pero fueron, al menos cualitativamente, válidos.

En la barra. Efecto del uso de los espolones curvos

Si los espolones curvos se pueden usar para excavar el lecho, ¿por qué no usarlos para obtener el mismo resultado en la barra misma? Tienen la ventaja de la simplicidad y el menor costo; colocados juiciosamente, podrían usarse para obtener resultados al menos provisionales, porque uno podría:

- d) Transformar los dos canales en uno solo, una situación mucho mejor desde el punto de vista hidráulico.
- e) Acentuar ciertas tendencias favorables en la evolución de la boca:
 - i) que el tramo entre los tajamares parezca aumentar aún más.
 - ii) que disminuya la importancia de la protuberancia (o bajo) de la barra pequeña.
 - (iii) que el cañón tiende a acercarse a la boca y/o ensancharse.

Mover el canal de la orilla derecha lo más rápido posible lejos de las estructuras cuya estabilidad ya es pobre

Pruebas con espolones curvos:

- c) Unión de dos canales por dos espolones curvos clásicos perpendiculares al eje del río a 6 km de la desembocadura (paso axial 400 m).

Formación inmediata de un canal (-35') que corta la cuenta y se une al cañón. La "ganancia" es notable a pesar de las altas pérdidas de energía que resultan en un proceso que es demasiado brutal.

- d) Pruebas con diferentes tipos de espolones curvos implantados en la margen derecha en el primer espolón (agresivo) y en la margen izquierda en diferentes posiciones.

Los resultados son excelentes, sobre todo si el espolón (clásico o agresivo) en la margen izquierda (clásico o agresivo) está a solo 200 m del final del tajamar. Hay excavación de la barra y el fondo de -35 a -40'.

Cabe señalar, sin embargo, que la realización de espolones curvos agresivos podría presentar dificultades ya que su construcción nunca se llevó a cabo en Colombia.