

Cartageria, 26 de octubre de 1.998.

Señores

COMITÉ EVALUADOR DE PROYECTOS

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Universidad de Cartagena.

Atte. Dra. Paulina Rondón de Dager.

E.S.D.

Estimados Señores:

Reciban un cordial y atento saludo.

Por medio de la presente, hago constar que he asesorado y revisado a satisfacción el trabajo de tesis "Análisis de las tendencias de evolución de la línea de costa y protección de las playas de Bocagrande. Tramo espolón Iribarren-Sector el Limbo" de el estudiante que opta por el título de Ingeniero Civil Mauro Antonio Maza Chamorro, el cual presento a su consideración.

Atentamente,



Ing. DALIA MORENO DE WOOD.

Docente Facultad de Ciencias e Ingeniería.

Cartagena de Indias D. T. y C., 26 de octubre de 1.998.

Señores
COMITÉ EVALUADOR DE PROYECTOS
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Universidad de Cartagena
Atn. Dra. Paulina Rondón de Dager.
E.S.D

Estimada Doctora Rondón:

Adjunto, hago entrega de un original y una copia de mi trabajo de grado: "Análisis de las Tendencias de Evolución de la Línea de Costa y Protección de las Playas de Bocagrande. Tramo Espolón Iribarren -Sector el Limbo", el cual presento a su consideración.

Atentamente,

Mauro A. Maza Chamorro
MAURO ANTONIO MAZA CHAMORRO.

**ANALISIS DE LAS TENDENCIAS DE EVOLUCION DE LA LINEA DE COSTA Y
PROTECCION DE LAS PLAYAS DE BOCAGRANDE. TRAMO ESPOLON
IRIBARREN – SECTOR EL LIMBO.**

MAURO ANTONIO MAZA CHAMORRO

**Tesis de Grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director

DALIA MORENO DE WOOD

Ingeniero Civil. Msc. en Recursos Hidricos.

Asesor

JOSE MARIA PABLO HORRILLO CABALLERO

Ingeniero Civil. Msc. en Ingeniería de Costas y Puertos.

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA
CARTAGENA DE INDIAS. D. T Y C.**

1.998

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Cartagena de Indias. D.T y C. (23 de noviembre de 1998)

| | | |
|---------------------------------------|---|-------|
| UNIVERSIDAD DE CARTAGENA | | |
| CENTRO DE INFORMACION Y DOCUMENTACION | | |
| FORMA DE ADQUISICION | | |
| Compra _____ | Donación <input checked="" type="checkbox"/> Canje _____ U. de C. _____ | |
| Precio \$ 3000 | Proveedor <i>Fac. cienc. e Ingen.</i> | |
| No. de Acceso 35657 | No. de ej. 1 | |
| Fecha de ingreso. DD 11 | MM 11 | AA 98 |

**A mi familia,
ellos saben por que.**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Dalia Moreno de Wood, que me enseñó a ver el Mar.

Alfonso Arrieta Pastrana, por su valioso ejemplo.

El personal técnico y administrativo del Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental de la Universidad de Cartagena, por su apoyo y colaboración que hizo posible este proyecto.

El personal de la Dirección de Navegación y Puertos del Ministerio de Transporte por su invaluable ayuda en la búsqueda de información de este trabajo.

Todos aquellos autores a través de cuya obra encontré mi propia visión de las cosas.

Todos mis familiares y amigos que creyeron que este sueño podía hacerse realidad.



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|------------|
| INTRODUCCION..... | 1 |
| 2. DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO | 5 |
| 3. OBJETIVOS..... | 9 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL | 9 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS | 9 |
| 4. ANTECEDENTES | 11 |
| 5. ALCANCE..... | 36 |
| 6. MARCO TEORICO..... | 38 |
| 6.1 TEORIAS Y ECUACIONES A CONSIDERAR..... | 39 |
| 6.2 CONSIDERACIONES EN CUANTO AL OLEAJE..... | 58 |
| 6.3 ESQUEMA NUMERICO DE LA SOLUCIÓN..... | 61 |
| 6.4 LIMITACIONES DEL MODELO..... | 63 |
| 7. CONDICIONES OCEANOGRAFICAS..... | 64 |
| 7.1 TEMPERATURA..... | 64 |
| 7.2 SALINIDAD | 65 |
| 7.3 MAREA | 65 |
| 7.3.1 <i>Análisis de marea del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional (C.I.O.H). Cartagena. 1990.</i> | 65 |
| 7.3.1.1 Componentes Armónicas Principales (Bahía de Cartagena)..... | 66 |
| 7.3.1.2 Pleamares y Bajamares | 67 |
| 7.3.2 <i>Análisis de marea realizado dentro del estudio "Bocana estabilizada en la Ciénaga de la Virgen Cartagena, Colombia". 1.996.</i> | 68 |
| 7.4 VIENTOS..... | 71 |
| 7.5 OLEAJE..... | 74 |
| 7.5.1 <i>Antecedentes en estudios de oleaje</i> | 76 |
| 7.5.2 <i>Análisis de oleaje mar afuera para el caribe colombiano con base la estadística del Global Waves Statistics</i> | 85 |
| 7.5.2.1 Correlación de datos de periodo y altura | 89 |
| 7.5.2.2 Obtención del porcentaje de ocurrencia de cada evento..... | 94 |
| 7.5.2.3 Comparación entre los resultados del análisis de los datos de la G.W.S con los obtenidos en el trabajo "Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena" de el Laboratorio Central de Hidráulica de Francia en 1.972..... | 95 |
| 7.6 CORRIENTES..... | 99 |
| 8. METODOLOGÍA | 104 |
| 8.1 RECOPIACION DE INFORMACION..... | 104 |
| 8.1.1 <i>RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN BIBLIOGRAFICA.</i> | 104 |
| 8.1.2 <i>Recopilacion de datos de campo existentes</i> | 105 |
| 8.1.2.1 Planos topograficos y batimetricos..... | 105 |
| 8.1.2.2 Muestreo sedimentologico..... | 110 |
| 8.2 ANALISIS PREVIOS A LA MODELACION..... | 110 |
| 8.2.1 <i>Análisis granulometrico.</i> | 110 |
| 8.2.2 <i>Análisis de distribución sedimentologica.</i> | 113 |
| 8.2.3 <i>Comportamiento de la linea de costa y analisis de las estructuras</i> | 115 |

8.2.4 Refracción del oleaje 122

 8.2.4.1 Metodología de análisis de refracción entre la cota -100.00 y -10.00 mts. 123

 8.2.4.2 Metodología de análisis de refracción entre las cotas -10.00 mts y -5.00 mts. 128

 8.2.4.3 Metodología de análisis de refracción entre la cota -5.0 mts y la orilla 130

 8.2.4.4 Análisis de resultados de Modelación con RCPWAVE 132

 8.2.4.4.1 Oleaje NE 132

 8.2.4.4.2 Oleaje N 134

 8.2.4.4.3 Oleaje NW 135

 8.2.4.4.4 Oleaje W 136

 8.2.4.5 Comparación de análisis de refracción con RCPWAVE con análisis precedentes. 136

 8.2.4.6 Análisis de franja de rotura 148

8.2.5 Esquema de migración de las arenas hacia el sector de Bocagrande 148

8.2.6 Analisis de antecedentes en tendencias de transporte de sedimentos 150

8.3 MODELACION MATEMATICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y CAMBIO DE LINEA DE COSTA CON GENESIS. 156

 8.3.1 Preparación para correr Génesis 156

 8.3.1.1 Sistema de Referencia 156

 8.3.1.2 Consideraciones en cuanto a archivos de entrada y salida de datos 157

 8.3.1.3 Manejo de Información de oleaje para la modelación 159

 8.3.1.4 Información sobre granulometria 160

 8.3.2 Calibración del modelo 160

 8.3.3 Modelación de tendencias de evolucion futura 210

 8.3.4 Presentación de hipótesis de evolución de la línea de costa 214

 8.3.5 Análisis y modelación de alternativas 216

 8.3.5.1 Modelación de relleno sin estructuras de retención 219

 8.3.5.2 Modelación de espolones 223

 8.3.5.2.1 Modelación de espolones hasta la cota -1.0 mts. 226

 8.3.5.2.2 Modelación de espolones hasta la cota -2.0 mts. 229

 8.3.5.3 Modelación de espolones como estructuras de retención de rellenos. 232

9. CONCLUSIONES 237

BIBLIOGRAFIA 244

INTRODUCCION

"Primero estaba el mar. Todo estaba oscuro. No había sol, ni luna, ni gente, ni animales, ni plantas. Solo el mar estaba en todas partes. El mar era la Madre. Ella era agua y agua por todas partes y ella era el río, laguna, quebrada y mar y así ella estaba en todas partes. Así, primero solo estaba la madre. Se llamaba Gaulchovang .

La madre no era gente, ni nada, ni cosa alguna. Ella era alúna. Ella era espíritu de lo que iba a venir y ella era pensamiento y memoria. Así la madre existió solo en alúna, en el mundo más bajo, en la última profundidad, sola."

Tradición Kogi recopilada por Gerardo Reichel - Dolmatoff.

Tratar de comprender El Mar es como enamorar una mujer, en esas dos ocasiones aparentemente diferentes debes aproximarte con paciencia, valor y ternura, sino vivirás para maldecir tus pasos. Los procesos que son propios del Mar son solo comparables a los de un organismo vivo y sensible por su complejidad e imprevisibilidad; siempre me ha gustado pensar en él así, como una criatura fuerte, majestuosa, juguetona, mutable, permanente y bella.

Es la intención de este trabajo analizar una zona bien delimitada del litoral de Cartagena de Indias como son las Playas de Bocagrande (Desde el Espolón Iribarren hasta el Sector El Limbo).

Se analizo este sector a la luz de las teorías existentes en Hidráulica Marítima e Ingeniería de Costas, apoyándonos en los estudios previos realizados por El Laboratorio Central de Hidráulica de Francia (1.972) y el Laboratorio de Ensayos Hidráulicas del Ministerio de Obras Publicas y Transporte (1.983 y 1.989) entre otros trabajos.

Se trabajó con información actualizada recopilada por el Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental de la Universidad de Cartagena a nivel de datos batimetricos y sedimentologicos, y bajo su orientación y patrocinio se hicieron los análisis y búsquedas de este trabajo de Tesis.

Para el análisis de la evolución del litoral entre 1.989 y los días que corren se utilizó un modelo matemático: Shoreline Modeling System S.M.S desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos. En este aspecto nuestro análisis se diferencia del hecho por el Laboratorio de Hidráulica de Francia, ya que este utilizo como instrumento de análisis un modelo fisico.

Se puede apreciar dentro del proyecto que frente a un modelo fisico el modelo matemático tiene ciertas ventajas, entre ellas esta el hecho de que no se invierte en la fase de preparación demasiado tiempo y dinero ya que en modelación matemática la preparación se centra en la selección de los datos de entrada y la calibración mientras que preparar un modelo fisico implica construirle.

Otra ventaja es el hecho de que un modelo numérico es más versátil, ya que permite ensayar una gran cantidad de alternativas de solución y aproximación al problema planteado sin los grandes cambios de infraestructura que requiere el modelo físico. A pesar de lo anterior los modelos matemáticos no son una panacea, pues todos tienen limitaciones, la de más peso es que generalmente se enfrenta un problema amplio, que para ser analizado ha tenido que ser encausado a través de una serie de teorías y métodos numéricos que parten de supuestos e idealizaciones, lo cual nos obliga a la revisión y verificación de los resultados de modelación a la luz de mediciones y la teoría del fenómeno estudiado.

Como se verá en este trabajo de tesis el modelo matemático fue utilizado solamente como una herramienta más, como un mecanismo de aproximación a la comprensión de los fenómenos y no como un oráculo, pues como dijo uno de sus creadores Mark Gravens en el documento "Wave Resolution effects on predicted Shoreline Positions" publicado en febrero de 1.997 en el Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering Vol 123. : "Debe tenerse en mente que el movimiento de los sedimentos en una playa y la evolución de una línea de costa dada son dependientes de las condiciones locales que a su vez son resultado de complejos procesos tridimensionales que interactúan no linealmente y que son dirigidos en una forma simplificada en el modelo. Los resultados de modelación deberían ser usados solo para hacer decisiones racionales acerca de las tendencias en el cambio en la línea de costa y no deben ser interpretados como un fin en sí mismos"

Como producto de este trabajo presentamos una hipótesis del patrón de evolución de las Playas de Bocagrande, un análisis de las alternativas de protección y estabilización de la actual línea de costa y una evaluación de la posibilidad de ampliar la franja de playas adyacente a la vía para crear un espacio físico apto para la posible ampliación de la Avenida Primera de 2 a 4 carriles.

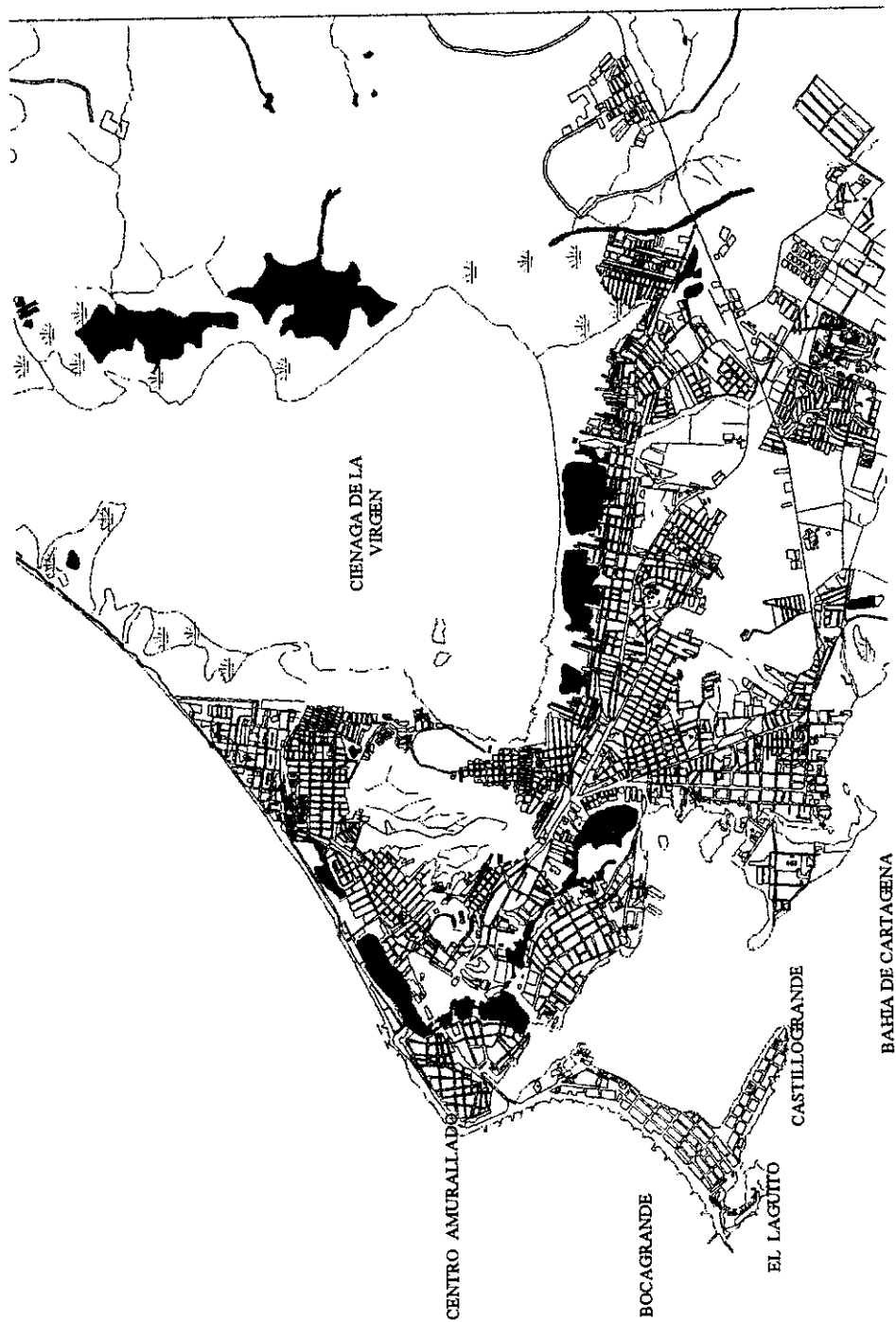
2. DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

El área de nuestro interés se encuentra en Cartagena de Indias en la zona de Bocagrande comprendida entre el espolón Iribarren ($10^{\circ} 24' 3''$ de latitud y $75^{\circ} 34' 5''$ de longitud WGS84) y el Sector El Limbo ($10^{\circ} 25' 19''$ de latitud y $75^{\circ} 33' 22.5''$ de longitud WGS84). (Ver Figura No 1).

De acuerdo al documento “Caracterización y diagnóstico de la zona costera comprendida entre Galerazamba y Bahía Barbacoas” del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. C.I.O.H. 1.998. “Bocagrande, al igual que los sectores de El Laguito y Castillogrande se puede considerar como una geoforma tipo espiga o flecha litoral, comenzando desde la de Punta Santo Domingo con dirección Noreste-Suroeste con una extensión aproximada de 3.5 Km. Al Llegar a su extremo opuesto a la altura del espolón Iribarren adquiere forma de gancho dando paso a los sectores del Laguito y Castillogrande.

“El sector es considerado como uno de los sitios turísticos más importantes de la ciudad de Cartagena.

FIGURA No 1. SECTOR DE BOCAGRANDE. CARTAGENA DE INDIAS.



Fuente: Caracterización y diagnóstico de la zona costera comprendida entre Galerazamba y Bahía de Barbaecos. C.I.O.H. 1.998.

Allí encontramos gran cantidad de hoteles, apartaestudios y espacios acondicionados para recibir al turista en su estadía en la ciudad, además de numerosos establecimientos comerciales, restaurantes, discotecas, centros comerciales, bancos y corporaciones, distribuidos especialmente sobre las principales vías, la San Martín y la Avenida Primera de Bocagrande.

Encontramos además edificaciones de carácter institucional como la base Naval "ARC" Bolívar y colegios."

Nuestra área específica de estudio es el sector de playas hacia mar abierto que tiene como límite posterior la Avenida Primera de Bocagrande, sector eminentemente turístico con grandes edificaciones de hoteles tales como Las Velas, Decamerón, El Dorado y Capilla del Mar entre otros, y edificaciones más pequeñas de dos y tres plantas con establecimientos comerciales tales como La Escollera, Valledupar y Flamingo Playa así como estructuras de tamaño intermedio con apartamentos y apartaestudios para uso residencial y comercial. Toda esta infraestructura (Bloque de edificaciones – Avenida Primera de Bocagrande), por la falta de control y planeación a nivel urbanístico han vuelto una utopía en este sector la franja de protección y reserva de 50 mts de playa a partir del nivel de mareas máximas, jurisdicción de la DIMAR, exponiendo la Avenida Primera y el sector turístico y residencial a eventuales riesgos futuros por incremento en el nivel medio del mar y tormentas tales como el Huracán Joan, que en 1.988 se hizo sentir con especial fuerza en esta zona.

El propio sector de playas se ve aún más reducido por infraestructura más ligera tipo cabañas y bohíos que se despliega para atender al turista. La zona de dunas de la playa al verse tan limitada invade en ciertas épocas de viento fuerte el trazado de la vía, llenando sus bordes de arena, que es retirada por los encargados de aseo urbano que desconocen que así se generan pérdidas en el balance de arena del sector.

Como se expuso anteriormente el sector de playas mencionado esta sometido a múltiples presiones, sumándose a estas el proyecto de ampliación de la Avenida Primera de Bocagrande de dos a cuatro carriles a realizarse dentro del Plan de Ordenamiento Vial de la Ciudad probablemente hacia el año 2.010.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar las tendencias de evolución de la línea de costa del tramo comprendido entre el Espolón Iribarren y el Sector El Limbo en Bocagrande utilizando el modelo matemático Shoreline Modeling System (S.M.S) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos y analizar alternativas de protección, estabilización y posible ampliación de la franja de playas del sector para así resguardar un tramo del actual trazado y la futura ampliación de la Avenida Primera de Bocagrande

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Analizar la evolución de la línea de costa de Bocagrande en el tramo comprendido entre el Espolón Iribarren y el Sector El Limbo en los siguientes aspectos: Variación de las características topográficas, batimétricas y sedimentológicas desde 1.989 hasta nuestros días.
2. Conocer con una buena aproximación los fenómenos de refracción, reflexión, difracción y rotura de oleaje en el sector.
3. Conocer la tendencia de los procesos de transporte de sedimentos de la zona.

4. Evaluar alternativas de protección y estabilización de la línea de costa para proteger el recurso turístico y paisajístico que las playas representan, contribuyéndose además al resguardo de la Avenida Primera de Bocagrande cuyo trazado actual es amenazado por los mares de leva de cada año y será muy posiblemente ampliada de 2 a 4 carriles dentro del futuro ordenamiento vial de la ciudad.

4. ANTECEDENTES

Si desde uno de los hoteles con vista al mar de Bocagrande miramos las obras de defensa y protección de las playas, la búsqueda del origen de estas nos puede hacer retroceder en el tiempo casi 50 años.

Si recorremos la zona a pie y observamos sus edificaciones, el trazado de las calles, la actividad económica y la vida cultural y nos preguntamos por que esta porción de tierra es como es y no de otra manera tal vez encontremos respuesta a esta pregunta remontándonos a hechos lejanos de nosotros unos 70 años.

Si uno de estos días queremos cruzar en una lancha desde Bocagrande hasta la Bahía, utilizando el canal que lleva el nombre del sector, las piedras de la escollera submarina nos hablarán de los afanes de hombres de hace 3 siglos.

Si escarbamos hasta cierta cota por debajo del nivel del suelo en algunos lugares encontraremos una capa suave de tipo vegetal que testimonia que mucho más atrás el manglar, las dunas de arena y los pantanos salobres debieron ver desfilar ligeras canoas en las que remaban hombres y mujeres semidesnudos hace más de 500 años.

Por ser producto de una evolución lenta y no de un proceso brusco haremos un recuento breve pero extenso en el tiempo de nuestra zona de estudio.

La región en la que esta enmarcada Bocagrande estaba antes de la conquista dentro del radio de acción de la tribu o cultura de los Mocanaes, perteneciente a la raza Caribe. Reproducimos a continuación los nombres de algunos de los pueblos en los que se agrupaban estos indígenas: Bahaire (Barú), Caramari o Calamarí (Cartagena), Canapote, Carón (en Tierrabomba), Cocó (Cocón en Barú), Codego (en Tierrabomba), Cornapacúa (en Cartagena), Matuna, Tesca y Yurbaco (Turbaco).

Cada uno de estos pueblos era gobernado por un Cacique, al que asesoraba un mohán o "piache", que era el hechicero de la tribu, casi siempre el nombre de la población era el del mismo Cacique, entre estos los más nombrados por los historiadores de aquellos tiempos están: Dulio y Duhoa, en la población de Bahaire en la Isla de Barú, Carex, Señor de Codego, o sea Tierrabomba y Cocó, cacique de una población en Barú, entre otros.

Dentro de los elementos culturales dignos de destacar en estos indígenas están: sensibilidad y cuidado en sus ritos funerarios, la estructura gramatical de su lengua en la que no faltaban conceptos abstractos, su gran conocimiento de la naturaleza que les circundaba, su habilidad en el tejido y en la construcción de embarcaciones, su sentido agudo de la orientación que revela algún conocimiento sistemático de astronomía y su sentido estético en el arte de la cerámica y la orfebrería.

Fueron exterminados en el proceso de conquista, según los exploradores españoles por su extrema belicosidad, que deberíamos entender como valor al defender lo suyo, Fernández de Enciso les describió así en 1.516 “ la gente de esta tierra es bien dispuesta, pero los hombres y las mujeres andan todos desnudos como nacen, son belicosos, usan arcos y flechas, tiran de la flecha con yerba de la mala y pelean las mujeres tan bien como los hombres”.

En 1.533 Pedro de Heredia funda la ciudad de Cartagena cuyo devenir histórico estará de ahí en adelante íntimamente ligado con la evolución morfológica de Bocagrande, en especial la de la llamada Boca de Bocagrande, en lo concerniente a los esquemas defensivos que los españoles debieron usar para proteger el sector amurallado en la época colonial.

Según Enrique Cabellos Barreiro en su libro “Cartagena de Indias Mágica Acrópolis de América”:

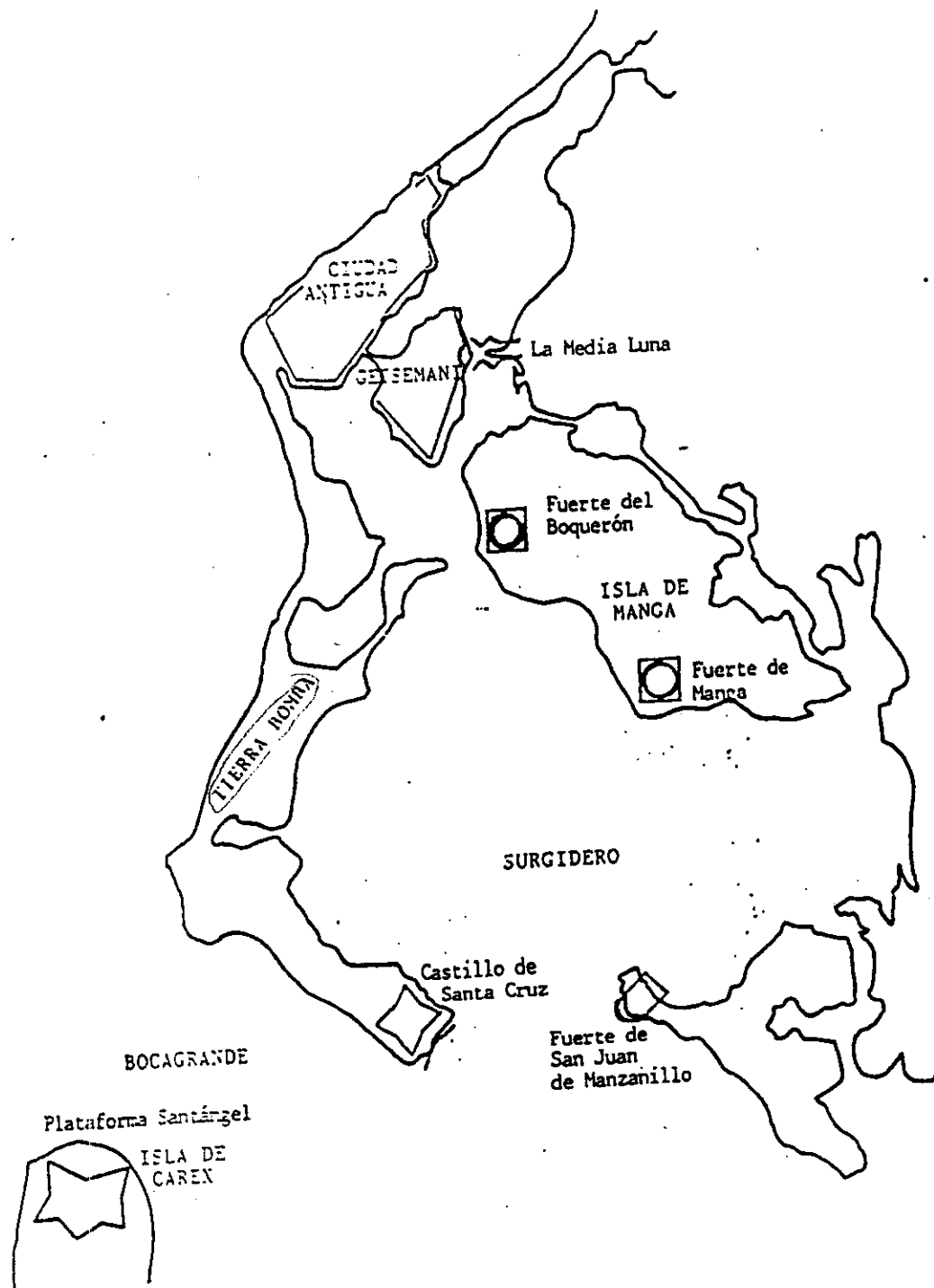
El crecimiento de Cartagena, su significación de adelantada que le confiere Felipe II, y su actuación como base de los <<Galeones de Tierra Firme >>, despierta el interés y la codicia del corsario inglés Francis Drake que, en 1.586, entra por la canal de Bocagrande con una formidable flota de veintitrés navíos y más de tres mil hombres.

El ataque con lanchas al Muelle de la Aduana fracasa, al encontrar cerrado el paso del Boquerón, y se ve obligado a desembarcar en las costas de la Península de Bocagrande, atacando durante la madrugada, siguiendo la línea de la playa que le conduce a La Caleta, donde se encuentra el actual Parque de la Armada, y donde, años más tarde, se construyó el baluarte de Santo Domingo. En esta zona el asentamiento no contaba con ningún tipo de defensas y, al amanecer, Drake ya era dueño de la ciudad.”

“En esta primera parte del siglo XVII, hasta 1.640, la poliorcética de Cartagena de Indias comienza en Bocagrande que es el canal de entrada natural al surgidero. El resto de la bahía no se considera al ser un espacio muerto y sin utilización, con la entrada de Bocachica inoperante. La estrategia defensiva, ya señalada por Bautista Antonelli, se ciñe a la protección de la entrada de Bocagrande y del surgidero. (Ver Figura No.2.)”.

“La fecha del 17 de marzo de 1.640 es decisiva para la poliorcética de Cartagena. Es el día en que la nave capitana y dos galeones de la armada portuguesa de Rodrigo Lobo da Silva encallan en los bajos de una barra que se estaba formando en el canal de Bocagrande. El proceso de aterramiento debía haberse iniciado mucho antes y las naves embarrancadas no hacen más que acelerarlo, produciendo una rápida sedimentación de arenas.

FIGURA No2. MORFOLOGIA DE BOCAGRANDE HASTA 1.640.



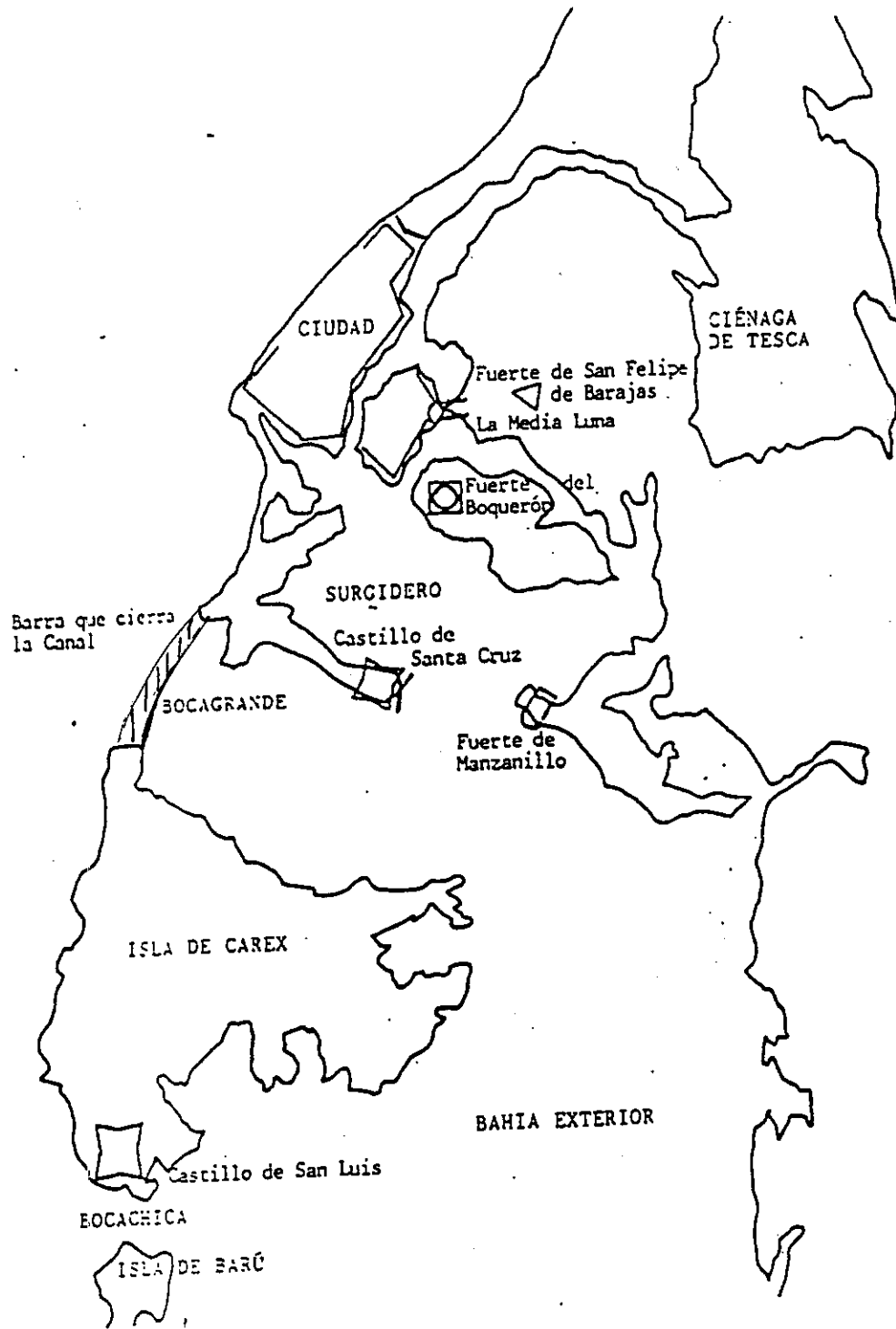
Fuente: Cartagena de Indias Magica acropolis de America. Enrique Cabellos Barreiro.

La isla en que se asienta la ciudad y, en particular, la península de Bocagrande es lo que se conoce técnicamente como una <<flecha litoral >>, o sea un gran depósito de arenas que el mar lleva en suspensión y que, transportadas por la corriente paralela a la costa, se van moviendo cerca de la orilla, a modo de un río marino de agua y arenas que se transportan hacia el Suroeste impulsadas por las corrientes y los vientos Alisios. Es tan rápido el proceso, que dos años después la barra ha unido completamente a Bocagrande con la entonces llamada isla de Carex-o Careyes por deformación y también mencionada como isla de Alonso Nava por el nombre del que fue su propietario- y se puede pasar caminando, comenzando a aparecer la vegetación típica en la zona a base de manglares e icacos mezclados con algunos palos de mangos y matas de guineo entreverados con los espinosos guamachos que configuran el espeso arcabuco propio de esta región.

Este fenómeno hace que las fuerzas de la naturaleza se abran paso y las corrientes y mareas de la bahía profundizan y arrastran los fangos de Bocachica, convirtiendo este pequeño acceso, siempre despreciado con anterioridad, en la nueva y obligada entrada de la bahía exterior y de la ciudad. (Ver Figura No.3).

Los criterios defensivos basados en la protección de Bocagrande, quedan obsoletos y exigen que se replantee con urgencia una nueva política de protección y defensa de Cartagena”.

FIGURA No 3. MORFOLOGIA DE BOCAGRANDE 1.640-1.740.



En el año de 1.650 Pedro Zapata de Mendoza abre el Canal del Dique por primera vez, adelantándose en 200 años a la era de los canales, el trazado inicial permaneció en servicio casi permanente durante unos 29 años. La construcción del canal demandó la unión de caños, ciénagas y brazos desde el Río Magdalena hasta su desembocadura en el extremo Suroeste de la Bahía. Aparentemente esto no produjo cambios importantes en la geomorfología de la Bahía y las zonas aledañas pero desde entonces ha habido procesos vinculados a la mezcla de aguas.

En la actualidad el canal esta vinculado a procesos de sedimentación en la Bahía de acuerdo al documento "Protección y recuperación de playas de El Laguito" 1.994 en el periodo de lluvias o de vientos del Sur, la pluma de turbidez generada por él alcanza los sectores del Laguito, generándose contaminación de los fondos y las aguas que son apreciables en Bocagrande.

La comunicación de Bocagrande con la Isla de Tierrabomba a partir de 1.640 tuvo una repercusión no solo en el esquema defensivo de la ciudad, sino también en la vida económica de la misma ya que según Cabellos Barreiro:

"Podemos observar en los planos del siglo XVIII, realizados después del ataque del Almirante ingles Edward Vernon, en 1.741, como uno de los grandes tejares bajo la dirección de los jesuitas se encontraba en la isla de Tierrabomba, justo enfrente de la actual Bocagrande.

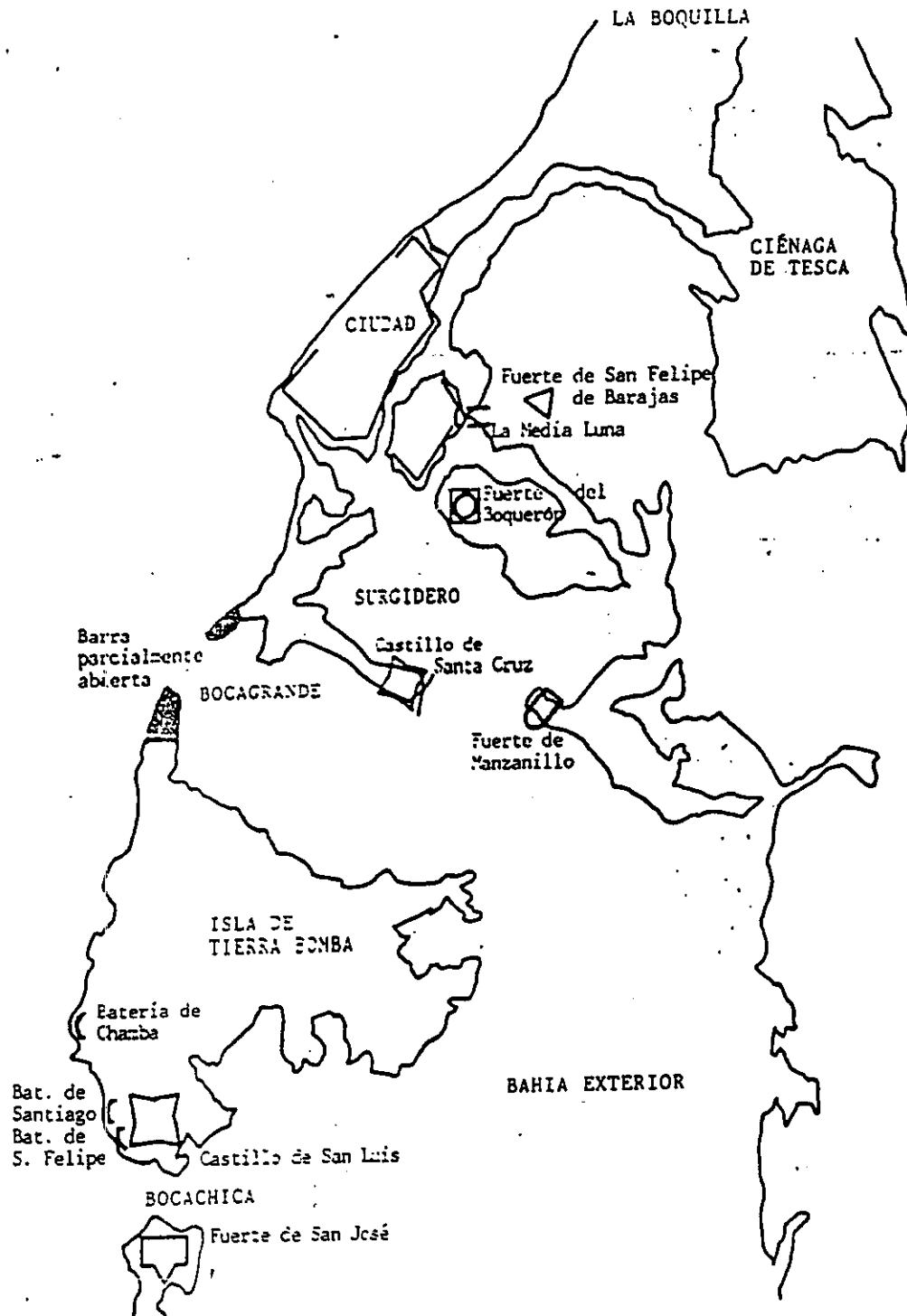
Aún cuando la isla se encuentra hoy separada de la población por el canal de Bocagrande, y puede extrañar la ocurrencia de los jesuitas de montar la industria aislada en una ínsula, teniendo que fletar por mar todos sus productos, la realidad fue muy distinta. El tejar de la orden religiosa se crea a principios de siglo cuando el canal de Bocagrande estaba cerrado por una barra que hacía de istmo. Tal debía ser su anchura y seguridad que, a su largo, debía existir un sendero apto para carretas que unía Tierrabomba con la plaza, más o menos por donde hoy transcurre el eje turístico de la Avenida San Martín .”

“Como hemos explicado, el Canal de Bocagrande se cierra, en 1.640, al naufragar varias naves portuguesas que retienen la arena y forman una barra. Un siglo más tarde, una pequeña obra para dar paso a unos botes de remo rompe el delicado equilibrio de las arenas y se abre nuevamente el canal (Ver Figura No 4)”.

En el cierre del Canal para defender la ciudad fracasó el Ingeniero Gobernador de la Ciudad Ignacio Salas, quien en 1.749 trabaja en un dique con cajones de madera rellenos de piedra que fue deshecho por el oleaje y las corrientes. Solo hasta 1.771 se inicia con el apoyo de la Corona y bajo la dirección del Ingeniero Antonio de Arevalo la construcción de una escollera o malecón para cerrar el canal que ya permitía el paso de fragatas de 24 cañones.

28

FIGURA No.4 MORFOLOGIA DE BOCAGRANDE.1.740-1.771

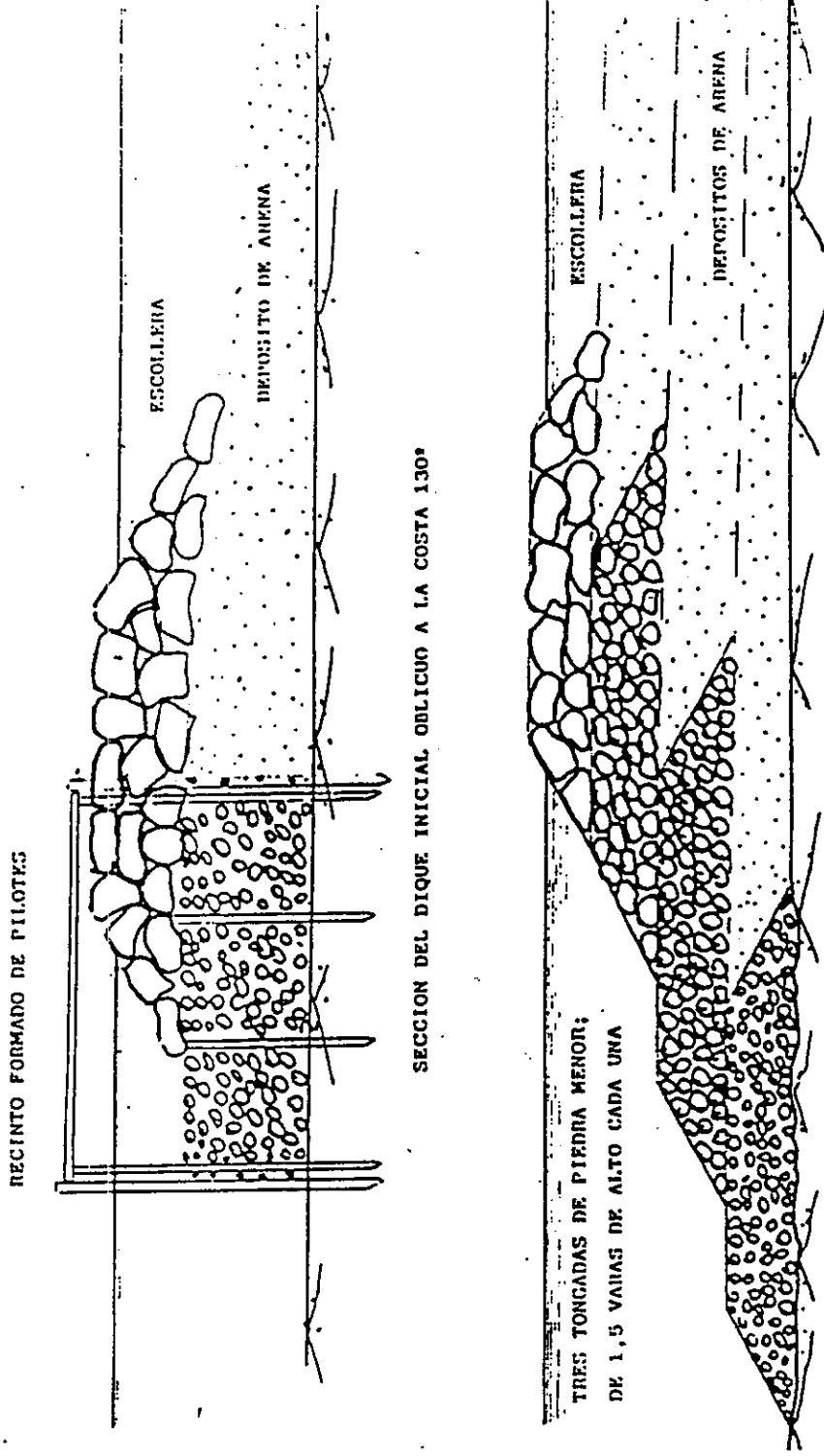


Fuente: Cartagena de Indias Magica acropolis de America. Enrique Cabellos Barreiro.

Es difícil evaluar el trabajo de Arevalo sin que nos invada algo de admiración, tal vez podamos considerarle un precursor de la Ingeniería de Costas de nuestros días, su manera económica, sencilla y técnicamente viable de enfrentar el problema del cierre del Canal de Bocagrande es una lección: primero construyó un dique recto de 1.000 varas de longitud que forma 130 grados con la alineación de la costa hacia barlovento, dicho dique estaba formado por alineaciones de troncos de cañaguatillo rellenas con piedra menuda de las canteras de Tesca y Tierrabomba, que eran un material barato, esta estructura quedaba una vara por debajo del agua para impedir así su resistencia al oleaje, pero por su longitud y poca permeabilidad retenía el sedimento que bajaba en dirección Norte-Sur, generándose detrás de él una playa, una vez formada esta Arevalo remató la cabeza del dique con piedra de manera tal que pudiera resistir los fuertes temporales (Ver Figura No 5).

Una vez estuvo listo el primer dique oblicuo Arevalo hizo que el alineamiento siguiente se quebrara para formar el dique de cierre propiamente dicho, que bloquearía todo el Canal de Bocagrande. Este dique tenía 2.460 varas de largo, y en ciertos sectores alcanzaba profundidades de 16 pies, ni por costos, ni por técnica hubiera sido posible hacer un dique monolítico en piedra como hoy les conocemos, en lugar de eso se utilizaron pequeñas banquetas de piedra de una vara y media de altura compuestas por piedras pequeñas de mediana calidad, vertidas desde embarcaciones, la acumulación de las banquetas generaba un obstáculo detrás del cual se iba asentando el sedimento, y se formaba una playa submarina encima de la cual se arrojaban más banquetas para que el proceso se repitiera.

FIGURA No.5 SECCIONES DE LA ESCOLLERA SUBMARINA.



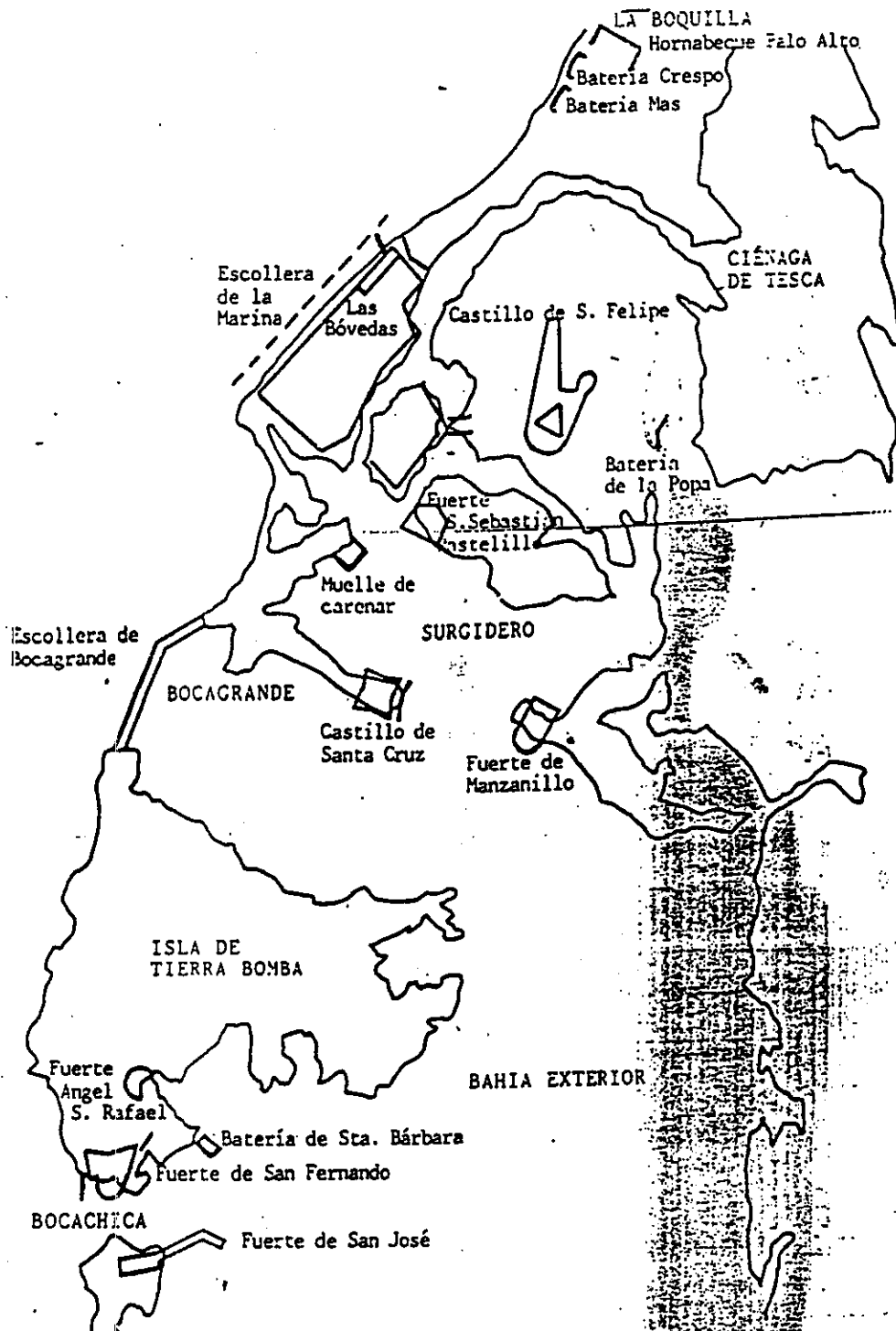
Fuente: Cartagena de Indias Magica acropolis de America. Enrique Cabellos Barreiro.

Así a partir de diques y playas sumergidas sucesivas se construyó la escollera submarina, la cual fue rematada con piedra de escollera sobresaliendo media vara por encima del agua.

“En el dique de cierre el Ingeniero Arevalo dejó un tramo de 500 varas sin cerrar con la escollera de la superestructura, con su nivel superior sumergido un pie y medio por debajo de la marea baja, para dar paso a las mareas y corrientes con el fin de que la bahía pueda respirar con los movimientos marinos y se refresquen sus aguas colaborando a la limpieza de caños y ciénagas. Para mayor seguridad dejó cada pocas varas obstáculos de piedra que evitasen el paso de botes y la entrada por sorpresa del atacante en embarcaciones de poco calado. A pesar de haber transcurrido más de 200 años desde entonces, el proyecto del ingeniero D. Antonio Arevalo perdura todavía. Ha perdido por el oleaje la cabeza de la escollera pero permanece aún la barrera que sigue impidiendo el paso de los buques”.(Ver Figura No 6).

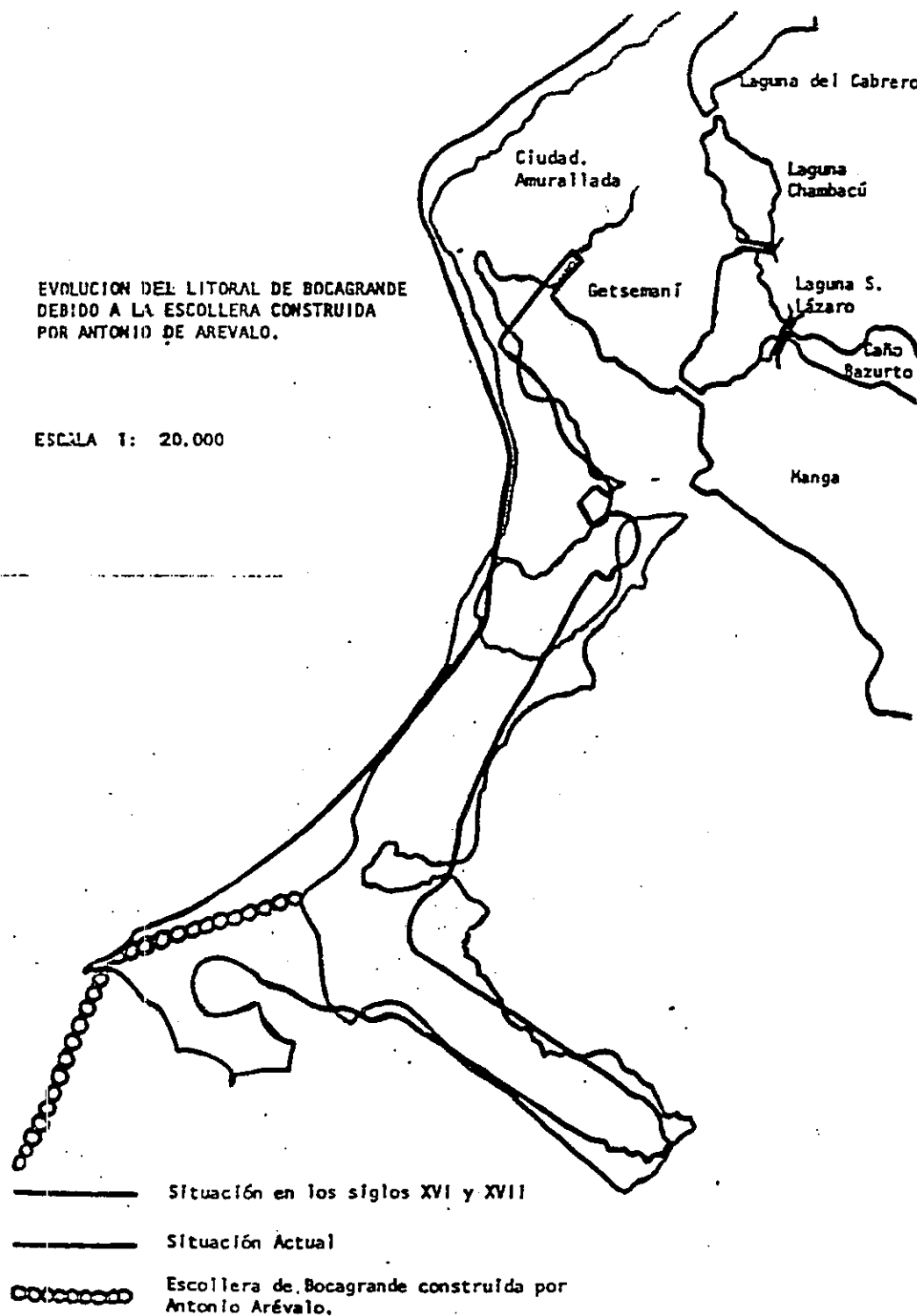
Después del cierre del Canal de Bocagrande con la escollera submarina, la dinámica de la zona cambio mucho, al abrigo de la escollera se generó del lado sur de esta una calma hidráulica que favorecería el génesis del actual sector del Laguito, la retención de sedimentos generada por la escollera fue también un factor decisivo en la acresión de las playas del sector sur de Bocagrande (Figura No 7).

FIGURA No. 6. MORFOLOGIA DE BOCAGRANDE CON LA ESCOLLERA SUBMARINA.



Fuente: Cartagena de Indias Magica acropolis de America. Enrique Cabellos Barreiro.

FIGURA No. 7 EVOLUCION MORFOLOGICA DE BOCAGRANDE, LAGUITO Y CASTILLOGRANDE DEBIDO A LA ESCOLLERA SUBMARINA.



Fuente: Cartagena de Indias Magica acropolis de America. Enrique Cabellos Barreiro.

Las tierras de la península de Bocagrande no fueron utilizadas para urbanización hasta el siglo XX, según la obra Historia General de Cartagena de Indias de Eduardo Lemaitre:

“Por sus condiciones peculiares la península había sido utilizada desde 1.920 como campo de aterrizaje, y allí puede decirse que nació la aviación comercial colombiana. También en 1.928, aterrizó allí, y siempre solitario, nadie menos que el celeberrimo aviador Charles Lindberg-primero en atravesar el Atlántico en un aeroplano- en su no menos famoso avión “The Spirit of Saint Louis”. Lindberg estaba realizando un vuelo de buena voluntad por Centro y Sur América”.

Cuando la Andian National Corporation, adquirió de la firma Velez Danies y Co., y a través de un tercero, la totalidad de los terrenos de Bocagrande, desde El Limbo hasta Castillogrande, esta península era un inmenso playon respunteado de dunas y manglares.

Lo primero que hizo la Andian, cuando adquirió esos terrenos, fue construir en la parte más próxima al centro amurallado, una veintena de casa en estilo californiano de moda en la época, para sus altos y medianos empleados, a los que se sumaron un poco más tarde unas cuantas residencias de ciudadanos cartageneros que “se atrevieron” a edificar sus hogares en aquellas soledades, en otro sector se organizó una cancha de golf muy elemental, pero luego el Presidente de la Compañía resolvió aprovechar el exceso de tierras para trazar allí una urbanización, para lo cual en 1.930 procedió a contratar una draga que rellenó y emparejó con caracolejo extraído de la bahía, todo el terreno de la península.

“Las tierras de la urbanización fueron puestas a la venta por etapas; pero el proyecto no cuajó fácilmente: había muchos intereses creados vinculados a Manga y al Pie de la Popa, y después de la llegada de la Andian, la ciudad no había vuelto a recibir flujo alguno de capitales importantes, ni de inmigrantes que dieran vida a aquel nuevo barrio. La Compañía resolvió así cerrar las ventas durante muchos años, y reservarse aquellas preciosas tierras para tiempos mejores. Como ocurrió al fin pero casi 30 años después. En efecto, hacia 1.960, revertida ya al Estado colombiano la concesión petrolera de “Las Infantas” en Barrancabermeja, la Andian levantó sus toldas de nuestra ciudad (aunque siguió siendo propietaria del oleoducto) y decidió al fin vender el resto de sus tierras en Bocagrande. Entonces los cartageneros se animaron a trasladarse a esa nueva urbanización y construir allí nuevas residencias, pero en un proceso lento que duró diez o quince años más.”

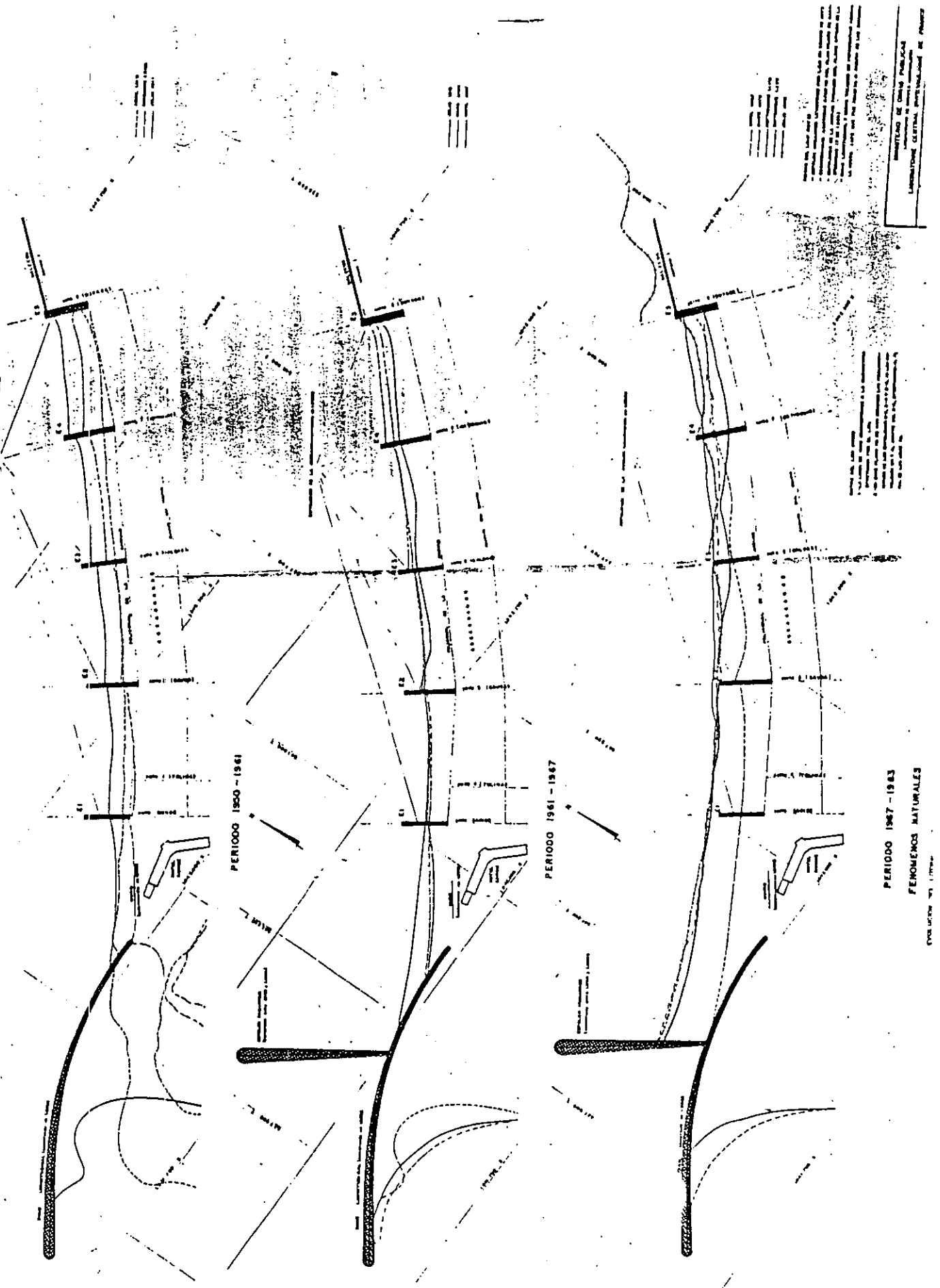
Con el paso del tiempo la vida comercial y sobre todo turística se convirtieron en la característica del sector que fue cifrando su atractivo en sus playas y sus hoteles. De ahí el interés de la nación en su conservación. En este siglo y comenzando con las estructuras hechas por la Andian fue que se continuó desde el siglo XVIII con la construcción de estructuras de protección y estabilización de la costa.

De acuerdo con el estudio "Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y el Laguito 1.983-1.989" del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos del Ministerio de Obras Publicas y Transporte en cuanto a la evolución de la línea de costa de Bocagrande entre el Espolón Iribarren y el Hotel Capilla del Mar son de destacar los siguientes aspectos (Ver Figura No 8):

- a) Los espolones que la Andian construyó en 1.952 produjeron inicialmente un avance en el sector Norte y un notorio retroceso en el sector Sur, al punto que en 1.955 fue necesario construir un muro de protección de las instalaciones del Hotel Caribe. Posteriormente en 1.961 la línea de playa avanzó en todo el sector, siendo mayor el incremento en el sector Norte.
- b) A partir de 1.965, el Espolón Iribarren produjo un avance de las playas en toda la zona, principalmente en el sector Sur donde entre 1.967 y 1.983 el incremento fue de 60 mt aproximadamente. Con respecto a 1.950, en 1.983 las playas en cercanías de este espolón habían avanzado unos 100 mt.
- c) A partir de 1.983, año en que se amplía la Avenida Primera de Bocagrande en el tramo del Hotel Caribe al Hotel Capilla del Mar y se construyeron los espolones de protección de la misma, se presentó un notorio retroceso en el sector Sur de las playas y un avance también notorio en el Norte, en medio de los nuevos espolones. Es de anotar que además de estas obras, al Norte del Hotel Capilla del Mar se habían construido varios espolones en T que crearon playas en un sector donde eran inexistentes.

FIGURA No. 8 EVOLUCION DEL LITORAL DE BOCAGRANDE. 1.950-1.983.

37



d) Entre febrero de 1.988 y abril de 1.989, periodo que comprende el paso del Huracán Joan, continua la tendencia descrita en el párrafo anterior siendo más notorio el incremento de las playas entre los espolones construidos en el sector Norte que el retroceso en el Sur.

e) Con respecto a la línea de playa que existía en 1.950, la cual puede considerarse como representativa del estado de equilibrio natural puesto que en esa época no se había construido ninguna clase de estructuras, la línea de costa de 1.989 representa un avance de unos 40 mt en el sector Sur y de unos 70 mt en el sector Norte.”

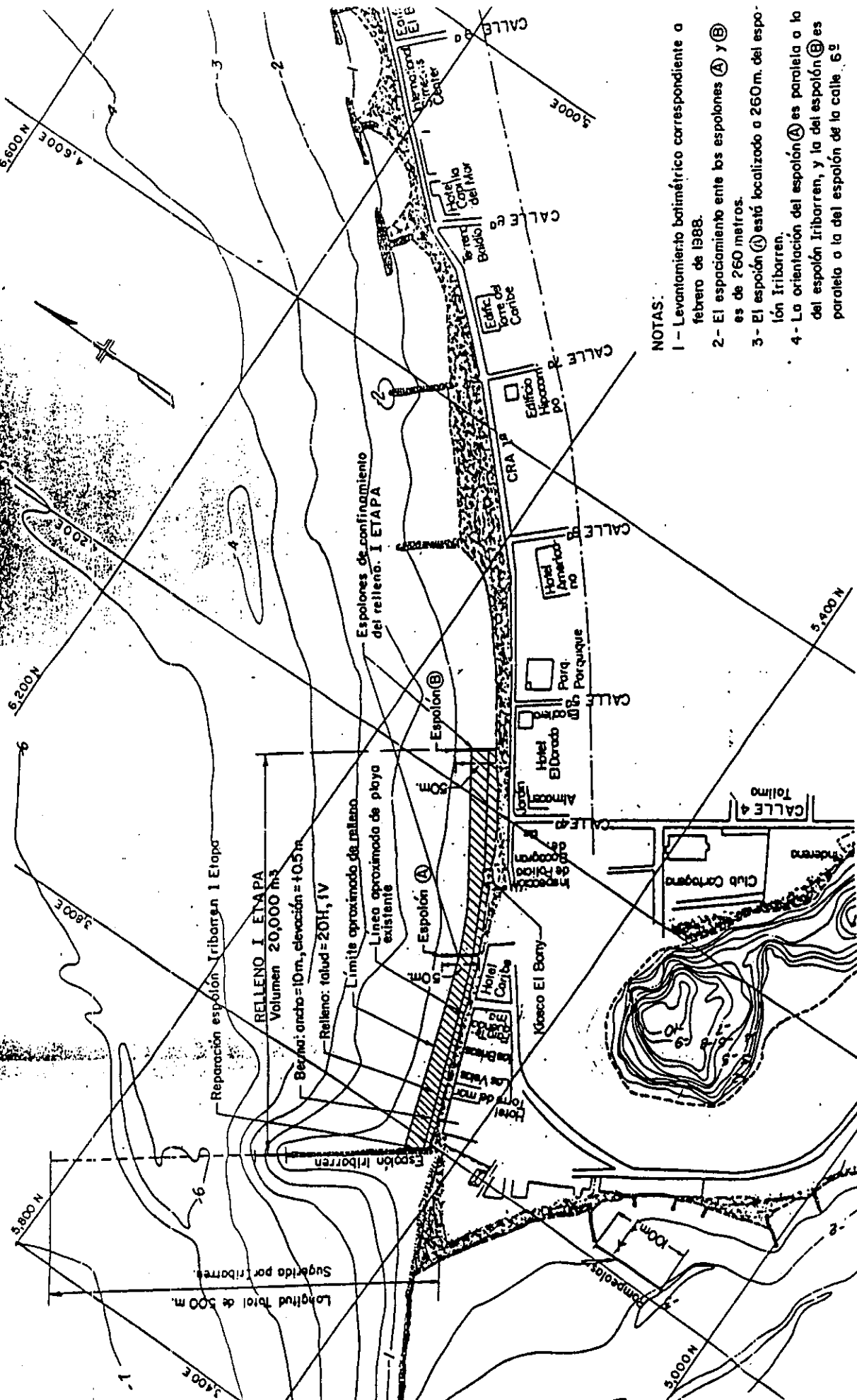
El sector Sur de las playas comenzó un acentuado proceso erosivo desde el paso del Huracán Joan en 1.988, dicha erosión se incrementó con los mares de leva subsiguientes.

Buscando solución a tal situación el MOPT encomendó al LEH el diseño de una solución de recuperación de las playas de dicho sector. Las obras recomendadas fueron dos espolones (E1 y E2 ubicados frente a el Hotel El Dorado y el Hotel Caribe), un relleno entre el Espolón Iribarren y el espolón E1 y entre el espolón E1 y E2 y la impermeabilización del Espolón Iribarren. (Ver Figura No 9).

Dicha solución veía como prioridad el relleno, ya que así se actuaba sobre el problema básico de la erosión del sector, sirviendo los espolones como estructuras de retención del relleno.

FIGURA No.9 DISEÑO DE OBRAS DE RECUPERACION DE BOCAGRANDE 1-990.

39.



- NOTAS:**
- 1 - Levantamiento batimétrico correspondiente a febrero de 1988.
 - 2 - El espaciamiento entre los espolones (A) y (B) es de 260 metros.
 - 3 - El espolón (A) está localizado a 260m. del espolón Iribarren.
 - 4 - La orientación del espolón (A) es paralela a la del espolón Iribarren, y la del espolón (B) es paralela a la del espolón de la calle 6ª.

| | | |
|---|---|------------------------------------|
| MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y TRANSPORTE | OBRAS DE RECUPERACION PLAYAS DE CARTAGENA | FECHA: ENERO 1990 |
| HIDROESTUDIOS | I ETAPA | DIBUJO: B.A.F. VERIFICADO: E.M. |
| | | Ref.: B10 |

Las obras proyectadas se dividieron en tres etapas, el diseño fue puesto a punto por el LEH hacia Junio de 1.990 estableciéndose que la primera etapa contemplaría la construcción de 50 mts de los 2 espolones y un relleno de unos 50.000 M3 a colocarse entre el espolón Iribarren y el espolón E2. La zona de préstamo recomendada inicialmente fue el interior del Laguito, cerca del empotramiento del espolón de estabilización de la boca.

Hacia el 12 de octubre de 1.990 el LEH pone a punto las especificaciones particulares y los planos de obras para continuar con la recuperación de las playas del sector Sur, a estas alturas se habían construido los 2 espolones E1 y E2 y se habían arrojado al mar 10.000 M3 de arena de las dunas de la misma playa.

Las obras proyectadas fueron la extensión en 35 mts de los dos espolones construidos anteriormente y la colocación de un relleno de 60.000 M3. Con las consideraciones antes mencionadas en cuanto a zona de préstamo. Hacia finales de 1.991 las obras estaban llegando a su termino.

En conclusión respecto a las obras de recuperación del sector Sur de las playas de Bocagrande podemos decir lo siguiente: El espolón E1 alcanzó la longitud de 125 mts, el espolón E2 alcanzó la longitud de 85 mts, hasta donde los pliegos del contrato muestran se depositaron entre el espolón Iribarren y el espolón E2 60.000 M3 de arena, aunque parece que las obras abarcaron también la zona entre los espolones E2 y E3 (frente al Hotel Americano, nuevo Hotel Almirante Estelar) ya allí se presentó una gran acresión y un

avance de la línea de costa entre 20 y 30 metros entre 1.988 y 1.996. La zona entre el espolón Iribarren y el espolón E1 presentó de 10 a 20 mts de avance y la zona entre el E1 y el E2 de 30 a 50 mts en el mismo periodo.

Considerando el estado actual de las playas y el cronograma de las tres etapas del proyecto elaborado por el LEH es cosa segura que se depositaron por lo menos 60.000 m³ de arena e hipotéticamente pudieron arrojarse entre 140.000 y 200.000 M³ de arena entre los espolones Iribarren y E3.

La línea de costa de Bocagrande ha sido sometida a análisis en múltiples ocasiones, en mayo de 1.972 el Laboratorio central de Hidráulica de Francia entregó al Ministerio de Obras Públicas y Transporte su trabajo: "Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena", una obra que a pesar de tener ya 25 años sigue siendo de valiosa ayuda en el estudio de la Hidrodinámica de la Zona Costera de Cartagena de Indias.

En este trabajo el equipo francés analizó las condiciones existentes en el sector de El Laguito, recomendó alternativas de manejo para esa franja de costa y evaluó los posibles impactos de las obras del Laguito sobre Castillogrande, así como la influencia de las obras de recuperación de playas en Bocagrande sobre las Playas de El Laguito y de Castillogrande.

Este trabajo es importante no-solo por analizar fenómenos tan complejos como la hidrodinámica del Laguito, sino por hacer un análisis global de las características de oleaje, corrientes y transporte de sedimentos de la Zona costera de Cartagena de Indias.

En el año de 1.983 el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos presento al Ministerio de Obras Publicas y Transportes su estudio: "Recuperación de las Playas de Bocagrande en Cartagena". Dicho trabajo fue hecho con miras a recuperar las playas del sector y proteger la ampliación de la Avenida Primera de Bocagrande en el tramo del Hotel Caribe al Hotel Capilla del Mar, contemplándose los siguientes aspectos: evolución de las playas desde 1.952 hasta 1.983, análisis de la línea de costa y estructuras existentes, sedimentología, vientos y oleajes y análisis de alternativas de protección de costa.

En agosto de 1.989 nuevamente el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos presenta un estudio sobre el sector, titulado: "Playas de Cartagena. Análisis de la Evolución de las Playas de Bocagrande y el Laguito (1.983-1.989)".

En este estudio se consideraron aspectos semejantes a los del anterior trabajo, apareciendo como novedad un análisis de un evento extremo: el huracán Joan que azotó nuestras costas en octubre de 1.988.

En agosto de 1.992 la Agencia de Cooperación Internacional de Japón publicó su trabajo "Estudio del Transporte Urbano en la Ciudad de Cartagena de Indias de la República de Colombia". Dentro de dicho estudio se precisó que la Avenida Primera de Bocagrande servía de corredor a 42.000 vehículos/día, ubicándose después de la Avenida Pedro de Heredia (con 56.000 vehículos/día) en el grupo de las vías con más alto volumen de tráfico de la ciudad, teniendo a su haber solo dos carriles y siendo una vía de dos sentidos. (Datos de 1.992). Dentro del Plan de Ordenamiento Vial delineado en dicho trabajo se plantea la necesidad de ampliar la vía de 2 a 4 carriles para que esta responda a las exigencias de capacidad que tendrá en el 2.010.

En 1.995 el Alcalde Guillermo Paniza Ricardo solicitó al Ministerio contribuir a la obra de ampliación de la Avenida Primera de Bocagrande. El Ministerio contestó al Distrito que previo al trazado y diseño de la vía se debía acometer el estudio de estabilización y protección de las playas del sector, labor que adelantaría el Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental en el marco del Convenio 998 suscrito entre la Universidad de Cartagena y ese Ministerio.

Como podemos ver el sector de Bocagrande ha sido estudiado a profundidad a lo largo del tiempo, lo cual favoreció este trabajo de tesis en la medida en que se tuvo acceso a una serie de publicaciones serias que iluminaron el análisis de las tendencias de evolución de la línea de Costa de Bocagrande y la protección de la misma.

5. ALCANCE.

Todo trabajo de tesis debe estar lo más delimitado posible, con miras a que a partir del seguimiento de un problema dado dentro de unas condiciones de espacio, tiempo y actividades a realizar conocidas se pueda dar una aplicación ágil y fructífera del método científico. Esto no significa que se debe escoger una tesis lo más pequeña posible para poder llevarla a efecto, existen trabajos (como este por ejemplo) en los que no se termina nunca en realidad, en los que cada aspecto a considerar puede dar material para investigaciones posteriores más profundas, por esto es de vital importancia para el graduando delimitar, tener claro cual es el alcance potencial de su trabajo, para así a partir de un esquema a su nivel poder aproximarse al problema y en la medida de sus posibilidades evaluar alternativas y obtener conclusiones.

Este proyecto contempla el análisis de la evolución de la línea de costa de Bocagrande comprendida espacialmente así: desde el Espolón Iribarren (Sector Hotel Las Velas) hasta el Sector El Limbo (a la altura de Seguros Bolívar en la entrada a Bocagrande).

El oleaje considerado para el análisis fue la distribución anual y mensual de oleaje en el Mar Caribe según estadística del Global Waves Statistics y el análisis de oleaje para el litoral de la ciudad de Cartagena considerado en el trabajo del Laboratorio central de Hidráulica de Francia "Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena" de 1.972.

Esta evolución del litoral será seguida desde 1.989 hasta nuestros días, haciéndose especial énfasis en las condiciones actuales con miras a poder hacer predicción del comportamiento del sector en los próximos diez años.

A nivel de actividades se espera que este trabajo aporte: Caracterización sedimentológica de la zona, estado actual de las playas, análisis de refracción del oleaje incidente sobre las playas, análisis de las tendencias del transporte de sedimentos y de la evolución de la línea de costa a lo largo del tiempo y evaluación de alternativas de protección y posible ampliación de la línea de costa paralela al actual y futuro trazado de la Avenida Primera de Bocagrande.

6. MARCO TEORICO.

Entendiendo marco teórico como la teoría científica que existe para abordar el problema a resolver hablaremos a continuación de las teorías y ecuaciones que gobiernan el funcionamiento del software Shoreline Modeling System (S.M.S) el cual será nuestra herramienta de trabajo en el estudio.

El S.M.S es un programa desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos el cual posee una serie de subrutinas dentro de las que se destaca el Generalized Model for Simulating Shoreline Change (GENESIS), un modelo numérico desarrollado con el fin de calcular cambios en la línea de costa producidos por el transporte de sedimentos a lo largo de la misma. Nuestro estudio se centra en la evolución de un sector de playas y la evaluación de unas alternativas para su protección estabilización y ampliación, por esto nos centraremos en la descripción teórica del GENESIS.

En esencia el modelo numérico GENESIS esta compuesto de dos submodelos:

El primero, el cual llamaremos de aquí en adelante "Modelo Interno de Transformación de oleaje", calcula bajo condiciones simplificadas la altura y el ángulo de aproximación a la costa de la ola en condición de rotura.

Estos datos nutren a su vez a un segundo submodelo el cual con base en esas condiciones de oleaje en rotura calcula el Transporte Litoral de arena a lo largo de la costa y la variación en la línea de costa inducida por dicho transporte de arena.

6.1 TEORIAS Y ECUACIONES A CONSIDERAR.

Como vemos las teorías y ecuaciones que hemos de examinar para llegar a la comprensión de los fenómenos evaluados por el modelo son los siguientes:

- a) Refracción y rotura de oleaje de acuerdo a la Teoría Lineal.
- b) Teoría del Transporte Litoral de arena y del Perfil de Equilibrio.
- c) Teoría del cambio de Línea de Costa.

a) Refracción y Rotura de oleaje de acuerdo a la Teoría Lineal.

Como ya dijimos el modelo numérico que usaremos considera al oleaje incidente sobre la costa como causante del transporte litoral de arena y las variaciones en la costa. De allí que nos sea necesario una buena comprensión de los fenómenos relacionados con El oleaje.

Podemos comenzar por idealizar una ola como una onda con las siguientes características:

Altura (H): Se define como la distancia vertical entre la cresta y el valle o seno de una ola determinada.

Longitud de onda(L): Es la distancia medida entre dos crestas o dos valles consecutivos.

Periodo (T): Tiempo que tarda en pasar por un punto fijo dos crestas o dos valles consecutivos.

Celeridad de la Onda (C): Es la velocidad con que se desplaza la onda definida como:

$$C = L / T.$$

Celeridad de Grupo (C_g): Es la velocidad con la cual se desplaza un grupo de olas o tren de olas, en general es un valor diferente al de la velocidad con que se desplaza una ola individualmente.

Para el análisis de oleaje se desarrollaron varias teorías matemáticas que han ido evolucionado a lo largo del tiempo, nos remitiremos aquí a la "Teoría Lineal de pequeña amplitud" desarrollada por Airy en 1.845, siendo notable su importancia pues se ajusta bastante bien al comportamiento real de las olas cuando están en profundidades en las que se puede despreciar el efecto de fondo.

Esta Teoría Lineal provee unas ecuaciones para determinar parámetros de una onda de oleaje de acuerdo a la profundidad relativa en que se encuentre la ola, así considerando d la profundidad y L_o la Longitud de onda en aguas profundas podemos establecer 3 zonas con condiciones diferentes para una ola:

Aguas profundas: $\frac{d}{L_o} > \frac{1}{2}$

Aguas Intermedias: $\frac{1}{25} < \frac{d}{L_o} < \frac{1}{2}$

Aguas Bajas o someras: $\frac{d}{L_o} < \frac{1}{25}$

Para cada profundidad relativa se han establecido ecuaciones para evaluar la celeridad, la longitud de onda, la velocidad de grupo y otros parámetros.

Es importante hacer esta aclaración pues la ola sufre toda una transformación al pasar de aguas profundas a intermedias y bajas y estará en consecuencia sometida a otras aproximaciones.

Así conforme a la profundidad disminuye, el fondo empieza a afectar el movimiento de las partículas de agua, debido al efecto de fricción, el cual provoca una reducción en la velocidad de propagación y en la Longitud de Onda.

Esta disminución de velocidad significa que cuando un tren olas de un determinado Periodo, entra en aguas intermedias y bajas las distintas partes de la cresta (frente de ola) se desplazan a diferentes velocidades dependiendo de la profundidad relativa a la que este

cada una, provocando que la cresta se deforme o doble en su proyección horizontal, de tal forma que tiende a hacerse paralela a las líneas batimétricas sobre las que se propaga. A este fenómeno se le conoce como Refracción.

Es importante la estimación adecuada de la refracción ya que los datos conocidos de oleaje siempre están referenciados a aguas profundas y los análisis que nos ocupan se desarrollan en aguas bajas e intermedias.

Así pues, los frentes de ola que se han generado en aguas profundas se aproximan a la costa sufriendo variaciones en su altura y su ángulo de aproximación a la costa, por el efecto de fondo hasta que la ola finalmente rompe.

Una ola puede romper por dos causas que son:

1. La relación de esbeltez o Peralte. $\frac{H}{L}$. El valor límite de esta relación es $\frac{H}{L} = \frac{1}{7}$ en aguas profundas. Una vez alcanzado ese valor la ola empezara su proceso de rompimiento disipando parcialmente su energía. La rotura de la ola ocurre cuando la velocidad de las partículas en la cresta se iguala a la celeridad de la onda y un incremento en la relación de esbeltez incrementa la velocidad de las partículas, provocando la inestabilidad de la ola.

2. Por efecto de fondo. En este caso la ola rompería por efecto de la profundidad del fondo, de acuerdo a la Teoría de la Onda Solitaria.

$$\frac{d_b}{H_b} = 1.28 \quad \text{o} \quad \frac{H_b}{d_b} = 0.78.$$

Donde d_b es la Profundidad del agua en la rompiente y H_b es la altura de la ola en la rompiente.

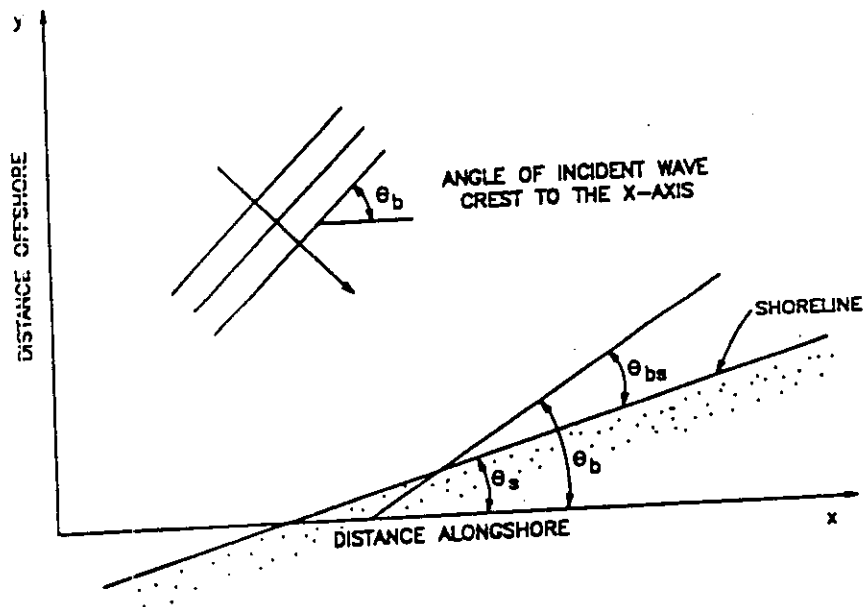
Esta expresión significa que una ola con una altura determinada romperá cuando la profundidad del fondo donde se desplaza alcance un valor de 1.28 veces su altura.

Como dijimos GENESIS posee un submodelo que calcula bajo condiciones simplificadas la altura y el ángulo incidente sobre la línea de costa del oleaje en rotura. Tenemos entonces 3 incógnitas para el calculo del oleaje en rotura: La altura de ola, la oblicuidad y la profundidad de rotura. Por tanto se hacen necesarias 3 ecuaciones para resolver estas incógnitas. (Ver Figura 10). Estas ecuaciones son:

Se usa la ecuación (1) para calcular la altura del oleaje en rotura tras su transformación por refracción y efecto de fondo.

$$H_2 = K_R K_S H_{ref} \tag{1}$$

FIGURA No.10. APROXIMACION DE UN FRENTE DE OLAS A LA LINEA DE COSTA.



Fuente: User's Guide to the Shoreline Modeling System (S.M.S). Department of the Army. US Army Corps of Engineers. 1992.

En donde

H_2 = altura de ola en rotura en un punto arbitrario a lo largo de la costa.

K_R = Coeficiente de refracción.

H_{ref} = Altura de ola a la profundidad de referencia.

K_S = Coeficiente de fricción por fondo (shoaling).

El coeficiente K_R es función del ángulo de arranque del rayo que representa al frente de olas y del ángulo de llegada a P_2 (punto en el que se evalúa), cuya localización esta determinada por la profundidad de rotura. K_R se calcula según la expresión:

$$K_R = \left[\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \right]^2 \tag{2}$$

En la que θ_2 es el ángulo del oleaje en P_2

El coeficiente de fricción por fondo (shoaling) K_S es función del periodo del oleaje, de la profundidad en P_1 (punto desde el cual parte el análisis), y de la profundidad de rotura, y se obtiene según la expresión:

$$K_S = \left[\frac{C_{g1}}{C_{g2}} \right]^2 \tag{3}$$

En la que C_{g1} y C_{g2} son las celeridades de grupo en el punto P_1 y en el punto de rotura respectivamente. La celeridad de grupo se define como:

$$C_g = Cn \quad (4)$$

siendo:

$$C = \frac{L}{T} \Rightarrow \text{Velocidad de fase del oleaje.}$$

L = Longitud de onda a la profundidad D .

$$n = 0.5 \left[1 + \frac{2\pi D}{L} \operatorname{sinh} \left(\frac{2\pi D}{L} \right) \right]$$

La longitud de onda se calcula a partir de la relación de dispersión

$$L = L_0 \operatorname{tanh} \left[\frac{2\pi D}{L} \right] \quad (5)$$

La ecuación para la rotura del oleaje por fondo se obtiene como:

$$H_b = \gamma D_b \quad (6)$$

En la que D_b es la profundidad de rotura, y el índice de rotura γ es función del peralte del oleaje en profundidades indefinidas y de la pendiente media de la playa:

$$\gamma = b - \alpha \frac{H_o}{L_o} \quad (7)$$

en donde

$$\alpha = 5.00 [1 - \exp(-43 \tan \beta)]$$

$$b = 1.12 / [1 + \exp(-60 \tan \beta)]$$

La oblicuidad del oleaje se calcula por medio de la Ley de Snell

$$\frac{\sin \theta_b}{L_b} = \frac{\sin \theta_1}{L_1} \quad (8)$$

En la que θ_b y L_b son respectivamente, el ángulo y la longitud de onda en el punto de rotura, y θ_1 y L_1 son las cantidades correspondientes a un punto exterior a desde el cual arranca el análisis. En el Modelo Interno de Transformación de Oleaje de GENESIS las 3 incógnitas H_b , D_b y θ_b , se obtienen en intervalos regularmente espaciados a lo largo de la costa por medio de la solución iterativa de las ecuaciones (1), (6) y (8) como función de la altura de la ola y del ángulo a la profundidad tomada como referencia, así como del periodo de oleaje.

La oblicuidad del oleaje en rotura con relación a la línea de costa, necesaria para calcular la tasa del Transporte Litoral a lo largo de la costa se obtiene como (Ver figura 10) :

$$\theta_{bs} = \theta_b - \theta_s$$

(9)

En la que $\theta_s = \tan^{-1}(\delta y / \delta x)$ es el ángulo que forma la línea de costa con respecto al eje "x" asumido como referencia para GENESIS.

b) Teoría del Transporte Litoral de Arena y Perfil de Equilibrio.

El transporte Litoral es el movimiento de material sedimentario en la zona litoral debido a la acción del oleaje y las corrientes. La zona litoral se extiende desde la línea de costa hasta detrás de los rompientes. El transporte litoral puede ser perpendicular a la línea de costa o paralelo a esta.

El GENESIS como ya dijimos posee fuera del Modelo Interno de Transformación de Oleaje un submodelo encargado del cálculo del transporte litoral y el cambio en la línea de costa, este submodelo considera solamente el Transporte Litoral a lo largo de la costa y lo hace dependiente de las condiciones del oleaje en rotura, es decir no se tienen en cuenta los efectos de las corrientes y el Transporte Litoral perpendicular a la costa.

La fórmula empírica que predice la tasa de transporte de sedimentos a lo largo de la playa, usada por el GENESIS es:

$$Q = (H^2 C_g)_b \left[a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos \theta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_b \quad (10)$$

donde:

H = Altura de la ola.

C_g = Velocidad de grupo dada por la teoría lineal.

b = Subíndice que denota la condición de rotura de la ola.

θ_{bs} = Ángulo de rotura de ola con la línea de playa local.

Los parámetros adimensionales a_1 y a_2 están dados por:

$$a_1 = \frac{K_1}{16(\rho_s/\rho - 1)(1-p)(1,416)^{3/2}}$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8(\rho_s/\rho - 1)(1-p) \tan \beta (1,416)^{7/2}}$$

donde:

K_1, K_2 = Coeficientes empíricos, usados como parámetros de calibración.

ρ_s = Densidad de la arena (características del sedimento).

ρ = Densidad del agua.

p = Porosidad de la arena en el fondo (características del sedimento).

$\text{tang}\beta$ = Pendiente promedio del fondo desde la línea de costa hasta la profundidad del transporte de arena a lo largo de ésta.

El factor 1.416 se usa para convertir la altura de ola significativa en altura de ola raíz-medio-cuadrática (rms) que es utilizada por el modelo.

El Primer termino de la ecuación (10) corresponde a la "formula de CERC" descrita en el Shore Protection Manual, SPM(1.984), y tiene en cuenta el transporte longitudinal de arena producido por incidencia oblicua del oleaje en rotura.

El segundo termino de la ecuación (10) se usa para describir el efecto del gradiente longitudinal de altura de ola en rotura. Esta contribución a la tasa de transporte litoral fue introducida en la modelación de la evolución de la línea de costa por Ozasa y Brampton.(1.980).

Aunque los valores de K_1 y K_2 se estiman empíricamente, son tratados como parámetros en la calibración del modelo.

El parámetro de transporte K1 controla la escala temporal de la simulación del comportamiento de la línea de costa, así como la magnitud de la tasa de transporte longitudinal de arena, este coeficiente controla por así decirlo la magnitud del sedimento que entra o sale de la playa. El parámetro K2 esta a su vez relacionado con la distribución de dicho sedimento en la playa.

El calculo del cambio en la línea de costa que da como salida GENESIS no requiere la especificación de la forma del perfil de la playa. Entiéndase por perfil una sección transversal o corte tomada perpendicular a la línea de costa, iniciándose en la orilla y avanzando hacia el mar. La estabilidad de este perfil depende de las características del sedimento, hay otros factores que influyen en su forma y pendiente tales como: condiciones de oleaje y corrientes, además de la geografía y características de la batimetría de la costa.

Para determinar la ubicación de la línea de rotura del oleaje a lo largo de la costa debe especificarse una forma de perfil. GENESIS utiliza la forma del perfil de equilibrio deducido por Bruun(1.954) y Dean (1.977).

$$D = Ay^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

En la que D es la profundidad y A es un factor de escala empírico, y es la distancia hacia fuera de la costa.

De acuerdo con Moore (1.982), el factor de escala A depende del tamaño del grano de la playa. GENESIS adopta la curva de diseño para A dada por Moore, aproximada por una serie de líneas expresadas como función del tamaño del grano del material próximo a la costa d_{50} (d_{50} en mm y A en unidades de $m^{\frac{1}{3}}$).

$$A = 0.41(d_{50})^{0.94}, d_{50} < 0.4$$

$$A = 0.23(d_{50})^{0.32}, 0.4 \leq d_{50} \leq 10.0 \quad (12)$$

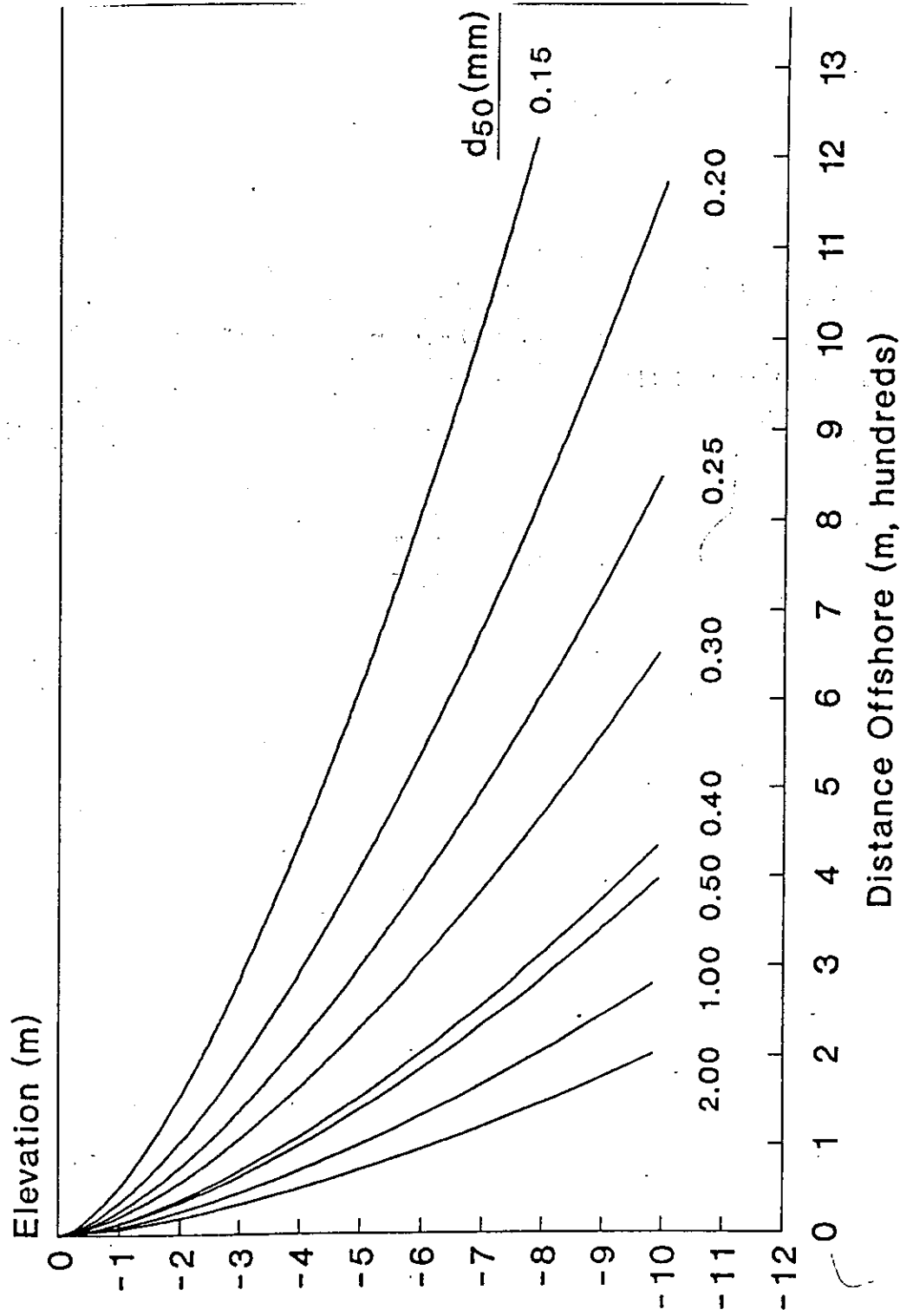
$$A = 0.23(d_{50})^{0.23}, 10.0 \leq d_{50} \leq 40.0$$

$$A = 0.46(d_{50})^{0.11}, 40.0 \leq d_{50}$$

(Ver Figuras 11 y 12).

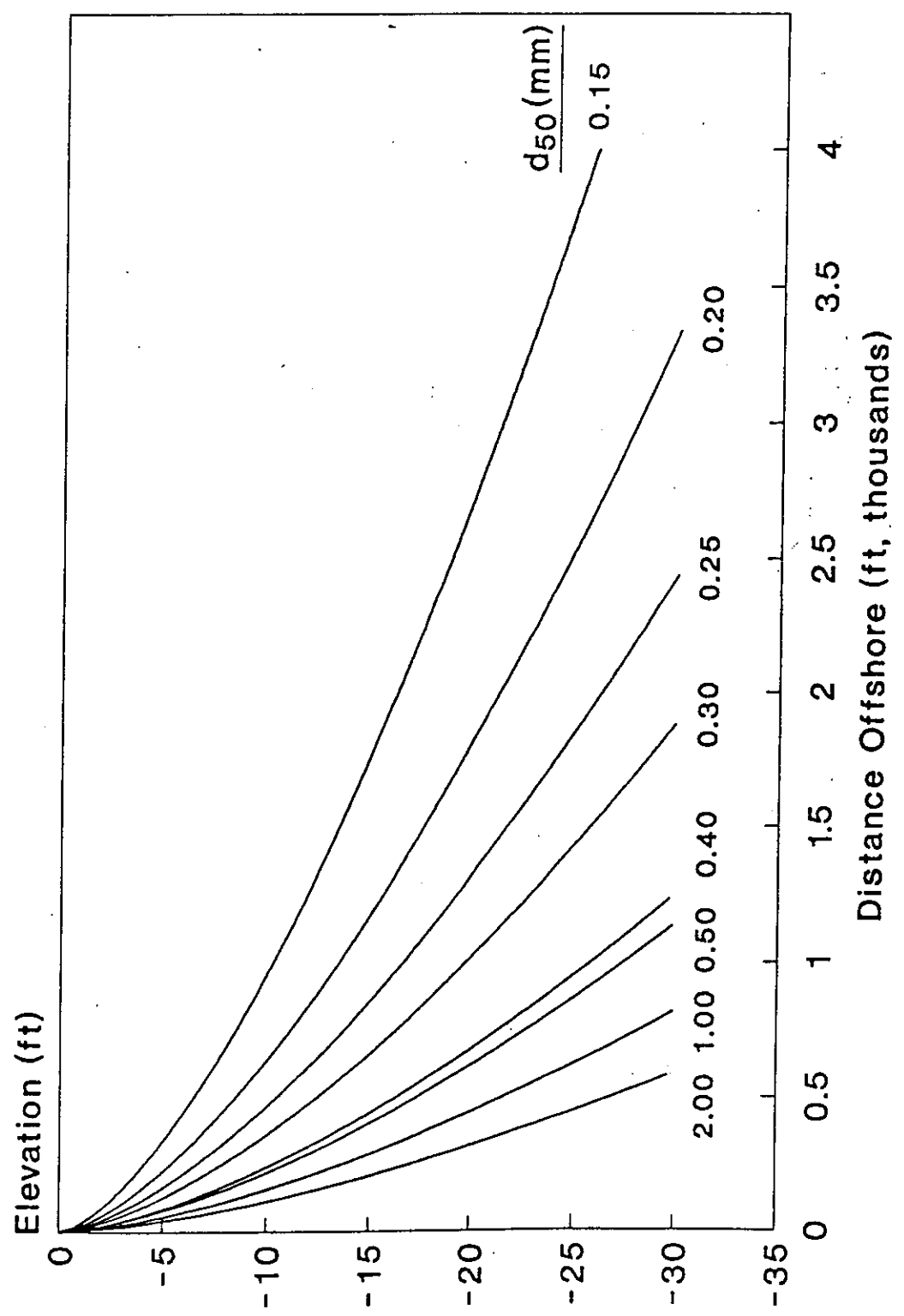
69

FIGURA No.11. CURVAS PARA EL PERFIL TEORICO DE UNA PLAYA SEGÚN MOORE.
(SISTEMA M.K.S)



Fuente: User's Guide to the Shoreline Modeling System (S.M.S). Department of the Army. US Army Corps of Engineers. 1.992.

FIGURA No12. CURVAS PARA EL PERFIL TEORICO DE UNA PLAYA SEGÚN MOORE.
(SISTEMA INGLES)



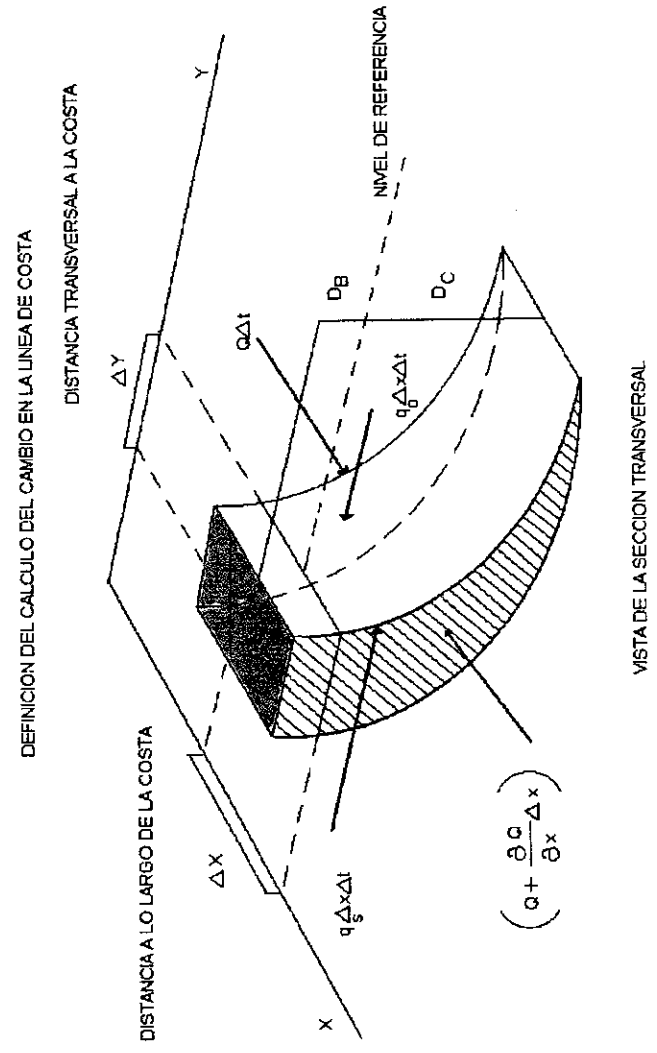
c) Teoría del cambio de línea de costa.

En resumen las suposiciones básicas efectuadas en la modelación de cambio de línea de costa son:

1. La altura de la berma(D_b) y la profundidad de cierre del perfil(D_c) son constantes.
2. La arena es transportada a lo largo de la costa por la acción del oleaje en rotura.
3. La estructura detallada de la circulación próxima a la costa es ignorada.
4. La forma del perfil de la playa es constante.
5. Hay una tendencia a largo plazo en la evolución de la línea de costa.

La ecuación que gobierna la respuesta de la línea de costa se formula a partir de la conservación del volumen de arena . Consideremos un sistema coordenado Cartesiano orientado, en el que el eje "y" se dirige hacia offshore y el eje "x" se orienta paralelamente al tramo de costa (Ver Figura. 13). La variable "y" denota, por tanto, la posición de la línea de costa, mientras que "x" denota la distancia a lo largo de la misma. Se supone que el perfil de playa se traslada hacia el mar o hacia tierra a lo largo de un tramo de costa sin cambiar de forma cuando una cantidad neta de arena entra o sale, respectivamente, de la sección durante un intervalo de tiempo ∂t . El cambio en la posición de la línea de costa es ∂y , la longitud del segmento de línea de costa es ∂x , y el perfil se mueve dentro de una extensión vertical definida por la altura de la berma D_B y la profundidad de cierre D_C , ambos medidos desde el nivel de referencia vertical.

FIGURA No. 13. ESQUEMATIZACION DE LA VARIACION DE LA LINEA DE COSTA EN FUNCION DEL TRANSPORTE LITORAL



Fuente: User's Guide to the Shoreline Modeling System (S.M.S). Department of the Army. US Army Corps of Engineers. 1.992.

El cambio de volumen de la rebanada $\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C)$ es determinado en función de la cantidad neta de arena que entra o sale de la sección por cualquiera de sus cuatro lados. Una de las contribuciones al cambio de volumen se produce si hay una diferencia ΔQ en la tasa de transporte longitudinal de arena, Q , en las caras laterales de las celdas. Este cambio de volumen neto es

$$\Delta Q \Delta t = \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \Delta x \Delta t$$

Otra contribución puede surgir a partir de una fuente o sumidero de arena $q = q_s + q_o$, la cual añade o quita un volumen de arena por unidad de anchura de playa, bien del lado de tierra a una tasa, o bien del lado de mar abierto a la tasa de q_o . Este proceso produce un cambio de volumen $q \Delta x \Delta t$.

Si sumamos las contribuciones y escribimos la ecuación del cambio de volumen, obtenemos

$$\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C) = \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \Delta x \Delta t + q \Delta x \Delta t$$

Readaptando los términos y tomando el límite cuando $\Delta t \rightarrow 0$, obtenemos la ecuación que gobierna el cambio de posición de la línea de costa:

$$\frac{\partial y}{\partial a} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left[\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right] = 0 \quad (13)$$

Para resolver la ecuación (13) deben darse tanto la posición inicial de la línea de costa a lo largo del tramo modelado como las condiciones de contorno en cada extremo de la playa, así como los valores de Q , q , D_B y D_C .

6.2 CONSIDERACIONES EN CUANTO AL OLAJE.

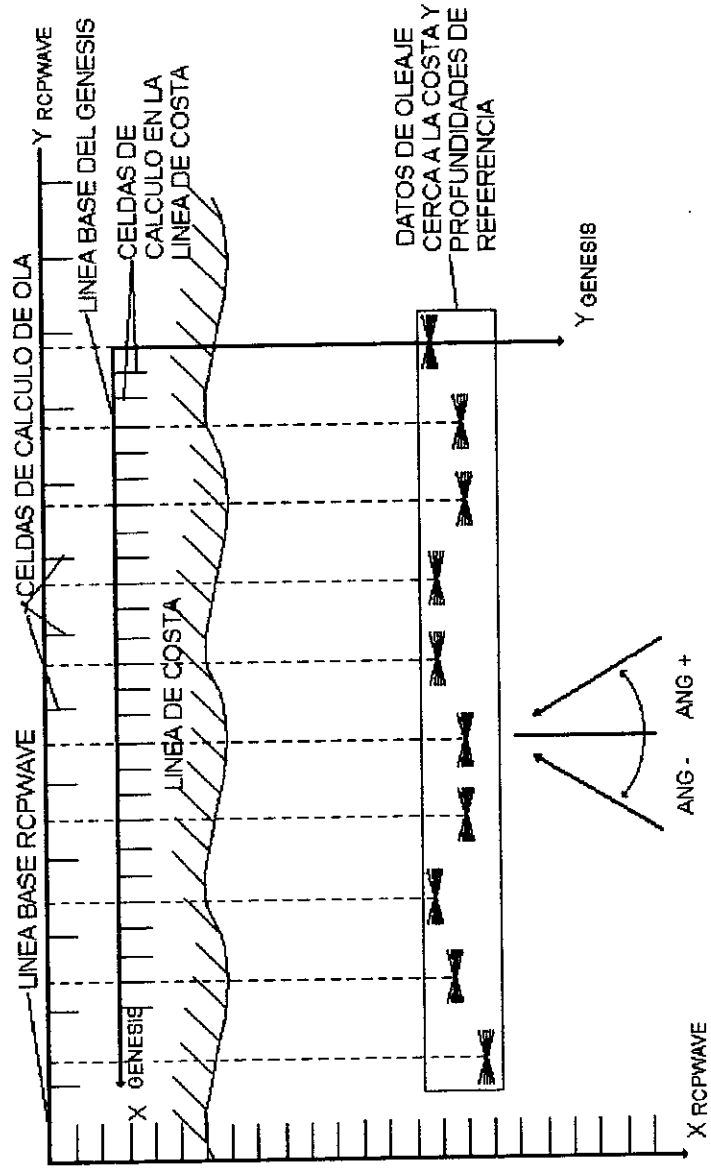
Como ya hemos dicho dentro del modelo numérico GENESIS existe un submodelo de oleaje que, bajo condiciones simplificadas, calcula la altura de ola en rotura y la oblicuidad de acuerdo con la información del oleaje correspondiente a una profundidad de referencia en mar abierto. Este "Modelo Interno de Transformación de Oleaje" es aplicable a un fondo marino con curvas de nivel aproximadamente rectilíneas y paralelas, en la cual la altura y el ángulo en rotura se calcula en puntos de la malla a lo largo de la costa, a partir de la profundidad de referencia especificada para el oleaje incidente.

Existe dentro del S.M.S (independiente del modelo numérico GENESIS) un programa llamado RCPWAVE que puede calcular la refracción del oleaje sobre la batimetría real que se le suministre, desde mar abierto hasta una línea de referencia próxima a la costa en las que las profundidades no correspondan a las de rotura del oleaje, guardando en un fichero el dato de altura, periodo, ángulo de entrada de la ola y profundidad para cada

punto sobre la línea de referencia cerca a la costa. Los datos de ese fichero pueden ser opcionalmente usados como una entrada adicional al modelo GENESIS. (Ver Figura 14.)

Este programa RCPWAVE dentro de la metodología de modelación con GENESIS es considerado un "Modelo Externo de Transformación de Oleaje" y se le utiliza dentro de la modelación de cambio de línea de costa cuando el fondo a evaluar es demasiado accidentado, como para poder asumir que las líneas de profundidad son rectilíneas y paralelas, su utilización no es obligatoria. Precisa como entradas la batimetría del caso y las condiciones del oleaje en aguas profundas (periodo, altura, ángulo) que recorrerán la batimetría.

FIGURA No. 14. ESQUEMA DE LAS MALLAS DE GENESIS Y DEL MODELO EXTERNO DE TRANSFORMACION DE OLEAJE (RCPWAVE).



Fuente: User's Guide to the Shoreline Modeling System (S.M.S). Department of the Army. US Army Corps of Engineers. 1.992.

UNIVERSIDAD DE GUATEMALA
 BIBLIOTECA FERNANDEZ DE MADRUGA
 Información y Documentación

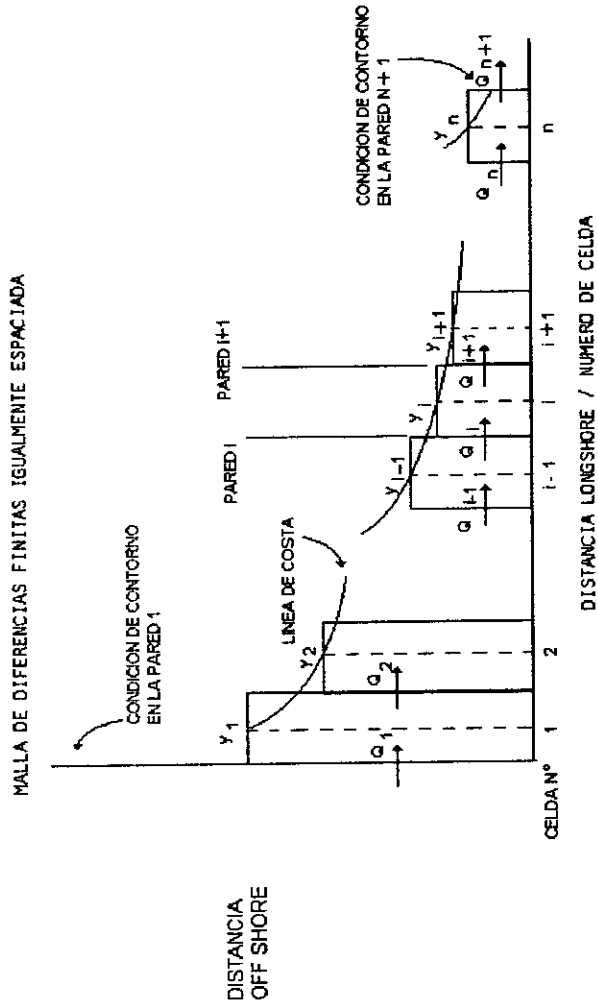
6.3 ESQUEMA NUMERICO DE LA SOLUCIÓN.

Si se dispone de toda la información necesaria para usar la ecuación (13) (Ecuación para el cambio de línea de costa), la ecuación (10) (Ecuación para la estimación del transporte de arena a lo largo de la costa), y la ecuación de criterio de rotura del oleaje del Modelo Interno de Transformación de Oleaje, puede calcularse la respuesta de la línea de costa debida a la acción del oleaje.

Bajo ciertas condiciones simplificadas, pueden hallarse soluciones matemáticas de la ecuación (13) de forma cerrada, pero a fin de describir las estructuras y las configuraciones de la línea de costa de forma realista incluyendo el oleaje variable a lo largo de la costa y con el tiempo, la ecuación (13) debe resolverse numéricamente.

En un procedimiento de solución numérica, la distancia a lo largo de la costa se divide en celdas de una cierta anchura (llamada espaciado de malla), y la duración de la simulación se divide, de manera análoga, en elementos pequeños (llamados intervalos de tiempo). Si el espaciado de la malla y el intervalo de tiempo son pequeños las soluciones de la ecuación diferencial en derivadas parciales que gobierna el proceso (ecuación (13)) puede ser calculada con precisión por medio de la solución numérica de la ecuación por el método de las diferencias finitas. (Ver Figura No 15).

FIGURA No.15 MALLA DE DIFERENCIAS FINITAS DE GENESIS



Fuente: User's Guide to the Shoreline Modeling System (S.M.S). Department of the Army. US Army Corps of Engineers. 1.992.

6.4 LIMITACIONES DEL MODELO.

- a) El modelo tiene una serie de restricciones para su aplicación, ellas son:
- b) No tiene en cuenta la reflexión de las estructuras.
- c) La línea de costa no puede tocar los rompeolas.
- d) Existen limitaciones sobre la localización y orientación de las estructuras.
- e) No tiene en cuenta los cambios en el nivel del agua inducidos por la marea.
- f) Limitaciones que son propias de la Teoría de Modelación de Cambio de Línea de Costa.

7. CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS

7.1 TEMPERATURA.

Según el “Atlas Climatológico del Caribe” publicado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional en febrero de 1.993, en el Caribe Colombiano “Se establece una temperatura media anual de 28°C. Las variaciones observadas en la temperatura media no superan los 2°C, esto se debe parcialmente a que la temperatura de la superficie del océano presenta fluctuaciones mínimas durante todo el año”.

De acuerdo al estudio “Protección y Recuperación de las Playas de El Laguito Sector Escollera Bocagrande – Espolón No. 2” en su anexo al capítulo 5 del Documento No. 1:

“La temperatura superficial del agua de mar varía entre 26.5°C y 28.5°C, aumentando ligeramente de Norte a Sur a lo largo de la costa. Sin embargo existe una variación “estacional” de la temperatura superficial que fluctúa entre 1.0°C y 1.5°C, siendo más caliente el agua en el período lluvioso (agosto-noviembre) que en tiempo seco (diciembre-abril). Las temperaturas disminuyen con la profundidad; para el área de Bocagrande y El Laguito se ha establecido un valor promedio de 0.3°C por cada 10 metros .

De acuerdo con lo anterior, en la zona de estudio se puede considerar que no existe una variación importante de la temperatura con la profundidad del agua de mar en el sector”.

7.2 SALINIDAD

De acuerdo al estudio “Protección y Recuperación de las Playas de El Laguito”: “Los valores de salinidad varían en superficie entre 31.7 y 36.2 partes por mil con promedio de 34.0 partes por mil (A. Pelgrain). Aumenta de la costa hacia mar adentro y de Sur a Norte a lo largo del litoral .Existe una variación estacional que se acerca a 4 partes por mil entre el período seco mayor salinidad, y el período lluvioso”.

7.3 MAREA.

Dentro de los análisis de marea disponibles se consultaron 2 fuentes:

7.3.1 Análisis de marea del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional (C.I.O.H). Cartagena. 1990.

Este trabajo es citado en la obra “Protección y Recuperación de las Playas de El Laguito”, 1994, en dicho estudio se concluyó:

7.3.1.1 Componentes Armónicas Principales (Bahía de Cartagena)

TABLA 1. MAREA. COMPONENTES ARMONICAS. DIURNA

| | AMPLITUD | ÁNGULO |
|---------------------------|----------|--------|
| Q1 Lunar elíptica mayor | 0.016 | 194.8 |
| O1 Lunar declinación | 0.067 | 161.1 |
| K1 Luni-solar declinación | 0.099 | 166.5 |
| P1 Solar principal | 0.033 | 166.5 |

Fuente: Análisis de marea del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional (C.I.O.H). Cartagena. 1990.

TABLA 2. MAREA. COMPONENTES ARMONICAS. SEMIDIURNA

| | AMPLITUD | ÁNGULO |
|-------------------------|----------|--------|
| M2 Lunar principal | 0.066 | 347.7 |
| S2 Solar principal | 0.018 | 261.6 |
| K2 Luni-solar principal | 0.005 | 261.6 |
| N2 Lunar elíptica mayor | 0.024 | 309.7 |

Fuente: Análisis de marea del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional (C.I.O.H). Cartagena. 1990.

La amplitud media A_0 es 0.814

7.3.1.2 Pleamares y Bajamares.

TABLA 3. VARIABLES RELATIVAS A LA ONDA DE MAREA

| | |
|-----------------------------------|--------------|
| GT Gran rango de mareas | 0.671 metros |
| TL Nivel medio de máxima marea | 1.190 metros |
| DHQ Desigualdad diurna de pleamar | 0.011 metros |
| DLQ Desigualdad diurna de bajamar | 0.017 metros |
| MN Rango de mareas | 0.375 metros |
| MTL Nivel medio de marea media | 0.844 metros |
| MHHW Nivel medio alto de pleamar | 1.028 metros |
| MLLW Nivel medio bajo de bajamar | 0.653 metros |
| MHW Nivel medio del mar | 0.876 metros |

Fuente: Análisis de marea del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional (C.I.O.H). Cartagena, 1990.

En síntesis se concluye:

- El régimen de mareas para la Bahía de Cartagena es “mixta diurna”.
- El rango de mareas astronómicas es de 0.375 metros.
- El nivel medio de bajamar es de 0.521 metros.

Los datos anteriores se basan en un análisis para dos meses de registros del mareógrafo del CIOH instalado en las Islas del Rosario. Estudios anteriores confirman este rango de mareas.

En la plataforma del Caribe Colombiano el efecto de la marea con relación al del oleaje es, por consiguiente, despreciable, sin embargo se debe tener en cuenta su efecto sobre la ola generada cuando hay Mar de Leva.

7.3.2 Análisis de marea realizado dentro del estudio “Bocana estabilizada en la Ciénaga de la Virgen Cartagena, Colombia”. 1.996.

En la memoria técnica de Hidrología del estudio antes mencionado se relaciona un análisis de mareas que se llevo a cabo sobre la serie de datos mensuales de las constantes no armónicas de 22 años registrados en el mareografo del Club Naval, en el Barrio de Castillogrande, Cartagena, entre los años 1.971 y 1.992.

TABLA 4. RESUMEN ANALISIS DE MAREA.

PROYECTO BOCANA ESTABILIZADA EN LA CIENAGA DE LA VIRGEN.

| REGIMEN DE MAREAS. ESTACION CLUB NAVAL.(1.971-1.992). | | |
|--|---|-----------------|
| SIGLA | CARACTERISTICAS DE LA MAREA | NIVEL(m) |
| HOT | Pleamar máxima (enero 10 de 1.983) | 1.24 |
| MHHW | Promedio de Pleamares superiores | 0.929 |
| MHW | Promedio de Pleamares | 0.865 |
| MTL | Nivel medio de mareas | 0.746 |
| MSL | Nivel medio del mar | 0.744 |
| MLW | Promedio de Bajamares | 0.634 |
| MLLW | Promedio de bajamares inferiores | 0.607 |
| LOT | Bajamar mínima. (diciembre 22 de 1.991) | 0.310 |

Fuente: Proyecto Bocana estabilizada en la Ciénaga de la Virgen. Haskoning-Carinsa.

Los niveles presentados están relacionados a la estación del Club Naval. Del análisis de los datos se concluyó que la marea en Cartagena es semidiurna, es decir, que presenta dos pleamares y dos bajamares diariamente. También se puede clasificar la marea como mixta por la diferencia de altura entre los dos ciclos, o como microtidal por el bajo rango de variación.

El valor de h_{100} , nivel de pleamar máxima con un periodo de retorno de 100 años, asciende a 1.29m. Relacionado al nivel medio del mar $MSL = 0.74$ m, el h_{100} llega a 0.55 m MSL .

Según El estudio "Obras de Protección del Anillo Vial de Cartagena. Sector Cabecera del Aeropuerto - Calle 70" publicado por el Ministerio de Obras Publicas y Transporte en julio de 1.993:

"Según el registro del mareografo, en el periodo comprendido entre 1.974 y 1.983, el nivel medio del mar correspondió a la cota I.G.A.C 0.73 msnm."

"...usualmente en la época de vientos, a la marea astronómica se superpone una marea meteorológica. De acuerdo con el LCHF, en sitios cercanos a Cartagena fueron observadas mareas meteorológicas de 1.20 m de amplitud, que podrían ser provocadas por la acción sobre el Mar Caribe de los vientos del NW a E, que contribuirían a aumentar el nivel del mar en la costa colombiana en particular. Este fenómeno podría ser una de las causas que influyen en el paso de las aguas sobre la zona de Bocagrande durante los mares de leva". En cuanto a eventos extremos vale la pena citar del mismo estudio lo siguiente: "De acuerdo con los niveles de agua registrados en el mareografo de Cartagena (IGAC), durante el huracán Joan se presentaron niveles máximos de 1.30 msnm y el nivel de bajamar fue de 1.00 msnm".

7.4 VIENTOS.

"El viento era un hombre que andaba por todo el mundo. Andaba por aquí y por allá, por todas partes. Pero un día se cansó y no quiso caminar más. Llegó a una casa y pidió posada. La gente le preguntó: "¿Tu quien eres?". "Soy el viento", dijo el hombre; "Vengo de lejos y estoy cansado". "Vete de aquí", decían; "Aquí no queremos viento". Entonces el hombre se fue y caminó lejos hasta llegar a otra casa. Llamo a la gente y pidió posada. La gente le decía: ¿Cuál es tu nombre? ¿Como te llamas?". El hombre decía: "Soy el viento. He andado mucho y quiero descansar". Pero la gente no le dió posada; le decían que se fuera.

El hombre siguió caminando y una noche llegó a Inchiráka. Pidió posada. La gente le preguntó quien era y cuando decía que era el viento, ellos decían: "Esta bien; entre y descanse un rato".

Desde entonces no hay viento en Inchiráka".

Mitología Kogi.

Las obras disponibles para consultar lo que se refiere a vientos son las siguientes:

"Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena", del Laboratorio Central de Hidráulica de Francia 1.972. En dicha publicación se presenta una estadística de viento comparativa entre Cartagena y la estación de las Flores (entre Barranquilla y Bocas de Ceniza).

Dicho estudio abarca para la estación de las Flores datos desde 1.958 hasta 1.964 (con 41.555 observaciones) y entre 1.968 y 1.971 (con 26.457 observaciones). Para Cartagena consideró datos entre 1.959 y 1.962 (con 25.460 observaciones).

Existe una compilación de datos de velocidad y dirección de viento del Aeropuerto Rafael Nuñez hecha por el HIMAT que comprende de 1.977 a 1.989, presentada en el estudio de Dario de la Torre "Estudio estabilización de la línea de costa entre Punta Volcán o Punta Canoas y Punta del Morro Grande, así como de la Boca del Arroyo Guayepo". 1.993.

Además en el informe de diseño de julio de 1.993 “Obras de protección del Anillo Vial de Cartagena Sector Cabecera del Aeropuerto – Calle 70” del Ministerio de Obras Publicas y Transporte se hizo un análisis de frecuencia de los vientos, con base en la evaluación horaria de la dirección y velocidad del viento en la superficie elaborada por el HIMAT en la estación del aeropuerto Rafael Nuñez, que comprende de 1.982 a 1.988.

Para refrescar las estadísticas antes citadas presentamos la siguiente compilación de valores medios mensuales, máximos y mínimos de velocidades de viento realizada por el IDEAM- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Tabla 5), con base en valores horarios de el aeropuerto Rafael Nuñez entre 1.977 y 1.995.

81

| ANO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1977 | | | | 5.40 | 3.30 | | | | | 1.40 | | 4.00 |
| 1978 | | | 5.40 | | | | | | | | 1.50 | |
| 1979 | | | | | | | 2.40 | 1.90 | 1.50 | 1.10 | 2.20 | 4.50 |
| 1980 | 4.80 | 5.50 | 5.00 | 4.10 | 2.70 | 2.60 | 2.50 | 1.60 | 1.20 | 0.90 | 1.90 | 3.90 |
| 1981 | 6.00 | 5.90 | 4.70 | 5.50 | 1.30 | 1.10 | 2.30 | 0.80 | 1.30 | 2.30 | 1.40 | 3.20 |
| 1982 | 4.50 | 5.80 | 5.70 | | | | | | | | | |
| 1983 | 6.10 | 5.40 | 5.70 | 5.80 | 3.70 | 2.00 | 2.90 | | 1.10 | | | 3.60 |
| 1984 | 5.50 | 5.50 | 6.40 | 4.00 | 1.40 | 1.10 | 0.80 | 1.20 | 0.80 | 0.90 | 0.70 | 2.80 |
| 1985 | 3.00 | 3.20 | 3.30 | 3.30 | 1.40 | 1.10 | 1.00 | 0.60 | 0.90 | 0.70 | 1.10 | 1.60 |
| 1986 | 3.10 | 2.70 | 3.60 | 2.80 | 2.10 | 1.30 | 2.20 | 1.60 | 1.10 | 0.40 | 1.60 | 2.10 |
| 1987 | 3.10 | 3.30 | 3.20 | 2.30 | 1.50 | 0.80 | 1.20 | 1.40 | 0.50 | 0.60 | 1.00 | 1.80 |
| 1988 | 2.90 | 3.30 | 3.40 | 2.90 | 1.50 | 0.70 | 0.60 | 0.70 | 0.60 | 0.80 | 0.20 | 2.10 |
| 1989 | 2.60 | 3.10 | 3.30 | 3.00 | 1.30 | 1.30 | 0.90 | 0.50 | 0.80 | 0.40 | 0.50 | 2.00 |
| 1990 | 2.20 | 2.60 | | | | | 0.80 | | | | | |
| 1991 | 1.70 | 2.90 | 2.30 | 2.00 | 1.00 | 0.90 | 1.50 | 1.00 | 0.60 | 0.30 | 1.10 | 2.10 |
| 1992 | 2.40 | 2.60 | 3.10 | 2.40 | 1.60 | 0.50 | 1.00 | 0.80 | 0.60 | 0.50 | 1.00 | 2.00 |
| 1993 | 2.00 | 3.20 | 2.60 | 2.40 | | 0.90 | 1.10 | 1.00 | 0.20 | 0.40 | 0.80 | 1.80 |
| 1994 | 2.20 | 2.40 | 3.00 | 2.50 | 1.30 | 1.10 | 1.70 | 0.90 | 0.50 | 0.40 | 0.50 | 2.10 |
| 1995 | 1.90 | 2.30 | 2.30 | 1.70 | 0.50 | 0.60 | 1.70 | 1.20 | | | | |
| V. MAX. | 6.10 | 5.90 | 6.40 | 5.80 | 3.70 | 2.80 | 2.90 | 1.90 | 1.50 | 2.30 | 2.20 | 4.50 |
| V. MIN. | 1.70 | 2.30 | 2.30 | 1.70 | 0.50 | 0.50 | 0.60 | 0.50 | 0.20 | 0.30 | 0.20 | 1.60 |

INSTITUTO DE HIDRAULICA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL
I.H.S.A.

ANALISIS DE LAS TENDENCIAS DE EVOLUCION DE LA LINEA DE COSTA Y PROTECCION DE LAS PLAYAS DE BOCA GRANDE. TRAMO ESPOLOON IRIBARREN-SECTOR EL LIMBO

MAURO MAZA CHAMORRO VALORES MEDIOS MENSUALES DE VELOCIDAD DEL VIENTO m/s - IDEAM APTO RAFAEL NUÑEZ

TABLA No 5

7.5 OLEAJE.

*"...Amaneció, abre los ojos; me iré con estas olas,
no estés preocupada..."*

J.J Ceratti.

En los procesos de transporte de sedimentos que gobiernan la evolución de la línea de costa el fenómeno oceanográfico motor, Rey, dueño y señor es el oleaje como pudimos apreciar en el numeral 6.1 del Marco Teórico de este trabajo , en el caso específico de Bocagrande su carácter típico de costa abierta hace que esto sea más real, de ahí que de los parámetros oceanográficos considerados en este estudio aquel que evaluaremos con más detenimiento será el de las ondas de oleaje.

En nuestro país no existe, ni hay antecedentes de un seguimiento sistemático con medidas del fenómeno de oleaje, por lo cual a lo largo de nuestra historia de trabajos en Hidráulica Marítima e Ingeniería de Costas nos hemos visto obligados a recurrir a otros sistemas de acopio de datos. En fenómenos naturales como el oleaje son preferibles listados de datos que tengan una gran extensión en el tiempo a mediciones de alta precisión y sofisticación hechas por un corto periodo, pues lo más interesante a evaluar del oleaje es como se distribuyen las posibles combinaciones de periodos, alturas y direcciones de olas a lo largo del tiempo (en un año o dentro de una época específica del año) y la estimación de las probabilidades de que un evento dado se presente pasado un tiempo dado (por ejemplo tormentas de una magnitud dada que retornen pasado un año, 10 años o un siglo).

En lo que se refiere a experiencias de modelación hechas con diferentes listados estadísticos de oleaje sobre una misma zona queremos destacar el trabajo de Mark Gravens “Wave Resolution effects on predicted Shoreline Positions” publicado en febrero de 1.997 en el Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering Vol 123.

En dicho estudio se explica como se hizo la comparación de la simulación del cambio de línea de costa (modelando con GENESIS) con medidas reales de evolución en la línea de costa de Delray Beach, Florida a lo largo de 70 meses, obteniéndose diferentes resultados en dicha comparación de acuerdo al tipo de datos de oleaje que se introducían al modelo. Se utilizaron 7 tipos diferentes de series de datos de oleaje de dicha zona.

En dicho trabajo Gravens es enfático al afirmar : “El uso de condiciones de oleaje concurrentes con el periodo modelado no mejoran significativamente los resultados de modelación que han sido obtenidos usando datos de oleaje determinados estadísticamente.”

Y agrega: “Ya que la estimación precisa de las futuras condiciones de oleaje no es posible, los Ingenieros de Costas deberían encontrar atractiva esta conclusión, ya que implica que una estimación razonable de la futura evolución de la línea de costa podría obtenerse con base en el uso de condiciones de oleaje representativas estadísticamente”.

En este trabajo de tesis es nuestro objetivo llegar a una buena comprensión de las tendencias de evolución de la línea de costa de Bocagrande y poder estimar con un razonable grado de precisión los cambios futuros de la misma. Estando gobernada dicha evolución por los fenómenos propios del oleaje, es determinante para nosotros tener acceso a una distribución estadística de datos de oleaje que sea representativa de la zona, es decir con suficiente extensión en el tiempo y dentro de la región Mar afuera del Caribe que tiene influencia sobre Cartagena de Indias.

7.5.1 Antecedentes en estudios de oleaje

El primer estudio de buen nivel que se hizo para obtener una aproximación al fenómeno de oleaje en el litoral Caribe fue el "Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena" de mayo de 1.972, realizado por el Laboratorio de Hidráulica de Francia para el Ministerio de Obras Publicas, este estudio analizó utilizando un modelo físico la dinámica costera del Sector El Laguito, pero para llegar a ese punto hicieron un profundo análisis de las condiciones de oleaje en mar afuera y las transformaciones que por refracción, difracción y otros fenómenos sufre el oleaje al aproximarse a la costa de Cartagena de Indias.

En aquella época como en nuestros días no existían observaciones sistemáticas de oleaje específicas para la zona de Cartagena, por lo que, para tener una idea del régimen de oleajes, éste tuvo que deducirse a partir de los vientos de la región que eran bastante conocidos.

El método utilizado para determinar el oleaje fue el desarrollado por Sverdrup, Munk y Bretschneider, más conocido como S-M-B, el cual consiste en calcular sus características (período y amplitud) para cada dirección de propagación a partir de la velocidad del viento sobre el área generadora del oleaje (Fetch), con una serie de ábacos.

Utilizando los datos de viento para Cartagena y Las Flores el equipo del Laboratorio de Hidráulica de Francia hizo un análisis del régimen de oleaje en el Mar Caribe obteniendo resultados diferentes según se utilizaran los vientos en Cartagena o en Las Flores. Se concluyó que era imposible saber cual de los dos era la representación más fiel del oleaje en el Mar Caribe, y que era probable que el verdadero régimen de oleaje en las proximidades de Cartagena fuera una combinación de los regímenes deducidos de los vientos en las Flores y Cartagena. Agregan además que se podía suponer que el oleaje de sector NE a N tenga que ser deducido de los vientos (alisios) en las Flores, pero que el oleaje de sector W este mejor representado a partir de los vientos en Cartagena.

La imprecisión del método usado en dicho estudio radica en dos razones: la primera es que no se conoce con exactitud la longitud del "fetch", la cual puede ser inferior a la distancia entre las dos costas según una dirección considerada. La segunda es que no siempre el viento sopla durante el tiempo suficiente para generar el oleaje calculado teóricamente. Como los mismos autores anotan esta es una solución no exenta de críticas. Sin embargo, agregan después, en las Flores los Alisios tienen una dirección y una velocidad constantes durante el tiempo suficiente para generar el oleaje calculado teóricamente en lo que se refiere a los oleajes del sector NE, más no se puede decir lo mismo de las olas con menor porcentaje de ocurrencia como las del sector W.

Adjuntamos las Tablas 6, 7 y 8 que presentan la repartición del oleaje en el Mar Caribe Colombiano determinadas en el estudio antes mencionado.

TABLA 6
REPARTICIÓN DEL OLEAJE (% DEL TIEMPO)
EN EL MAR CARIBE COLOMBIANO (MAR AFUERA)

| DIRECCIÓN | DE DICIEMBRE A ABRIL | DE MAYO A NOVIEMBRE |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| CALMA | 0.89 | 9.30 |
| N | 3.37 | 6.25 |
| NNE | 18.78 | 11.79 |
| NE | 36.04 | 11.74 |
| ENE A SSW | 39.02 | 51.08 |
| SW | 0.02 | 0.76 |
| WSW | 0.07 | 2.09 |
| W | 0.59 | 2.23 |
| WNW | 0.49 | 2.23 |
| NW | 0.24 | 0.84 |
| NNW | 0.40 | 1.62 |

Fuente: Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena 1.972.

TABLA 7
REPARTICIÓN DEL OLEAJE EN EL MAR CARIBE COLOMBIANO
DE DICIEMBRE A ABRIL

| DIRECCIÓN | ESTADÍSTICA | PERÍODO EN SEGUNDOS | | | | |
|-----------|--------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| | | 0 - 6 | 6 - 8 | 8 - 10 | 10 - 12 | >12 |
| NE | %DEL TIEMPO | 5.5 | 15 | 42.5 | 36.5 | 0.5 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.75 | 0.75 A 1.40 | 1.40 A 2.75 | 2.75 A 4.75 | >4.75 |
| NNE | %DEL TIEMPO | 12 | 31 | 43.5 | 13.5 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.80 | 0.8 A 1.60 | 1.60 A 3.15 | 3.15 A 5.40 | -- |
| N | %DEL TIEMPO | 42.5 | 44 | 13 | 0.50 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.80 | 0.8 A 1.70 | 1.70 A 3.40 | 3.40 A 5.80 | -- |
| NNW | %DEL TIEMPO | 85.5 | 14.5 | 0 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.75 | 0.75 A 1.40 | -- | -- | -- |
| NW' | %DEL TIEMPO | 76.5 | 13 | 0.5 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.70 | 0.70 A 1.25 | 1.25 A 2.40 | -- | -- |
| WNW | %DEL TIEMPO | 97.2 | 2.5 | 0 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.80 | 0.80 A 1.60 | -- | -- | -- |
| W | %DEL TIEMPO | 96.5 | 3.5 | 0 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.80 | 0.80 A 1.60 | -- | -- | -- |
| WSW | %DEL TIEMPO | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 1.15 | -- | -- | -- | -- |
| SW' | %DEL TIEMPO | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 1.30 | -- | -- | -- | -- |

Fuente: Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena 1.972.

TABLA 8
REPARTICIÓN DEL OLEAJE EN EL MAR CARIBE COLOMBIANO
DE MAYO A NOVIEMBRE

| DIRECCIÓN | ESTADÍSTICA | PERÍODO EN SEGUNDOS | | | | |
|-----------|--------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| | | 0-6 | 6-8 | 8-10 | 10-12 | >12 |
| NE | %DEL TIEMPO | 29 | 36 | 28.5 | 6 | 0.5 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.75 | 0.75 A 1.40 | 1.4 0A 2.75 | 2.75 A 4.75 | >4.75 |
| NNE | %DEL TIEMPO | 50.5 | 33.5 | 14.5 | 1.5 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.80 | 0.80 A 1.60 | 1.60A 3.15 | 3.14 A 5.40 | -- |
| N | %DEL TIEMPO | 75 | 23 | 2 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.80 | 0.80 A 1.70 | 1.70 A 3.40 | -- | -- |
| NNW | %DEL TIEMPO | 98.5 | 1.5 | 0 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.75 | 0.75 A 1.40 | -- | -- | -- |
| NW | %DEL TIEMPO | 95.5 | 4.5 | 0 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.70 | 0.70 A 1.25 | -- | -- | -- |
| WNW | %DEL TIEMPO | 98.5 | 1.5 | 0 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.80 | 0.80 A 1.60 | -- | -- | -- |
| W | %DEL TIEMPO | 95 | 4 | 0.75 | 0.25 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 0.80 | 0.8 0A 1.60 | 1.60A 3.15 | 3.15 A 5.40 | -- |
| WSW | %DEL TIEMPO | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 1.15 | -- | -- | -- | -- |
| SW | %DEL TIEMPO | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | AMPLITUD (m) | 0 A 1.30 | -- | -- | -- | -- |

Fuente: Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena 1.972.

Un análisis de oleaje más contemporáneo que el anterior fue el realizado dentro del informe de diseño del estudio: "Obras de Protección del Anillo Vial de Cartagena Sector Cabecera del Aeropuerto - Calle 70" de julio de 1.993, en dicha obra se hace una recopilación interesante de información de oleaje de fuentes tan diversas como el Laboratorio de ensayos hidráulicos y el U.S Navy Marine Climatic Atlas of The World. Transcribimos apartes de dicho trabajo a continuación:

"...El Laboratorio de Ensayos de Las Flores en 1.990 presentó su estudio "El clima de olas en el Mar Caribe entre Santa Marta y Bocas de Ceniza", con base en información recolectada y clasificada por la National Oceanic and atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos de América, a partir de informaciones suministradas por embarcaciones oceanográficas o navíos mercantes en aguas profundas del Caribe".

"Los resultados del trabajo indican que para las olas generadas en el área de observación, el 4% del tiempo la altura del oleaje es mayor de 3.25 metros, y que la moda se presenta para oleajes entre 1.25 y 1.75 m de altura. El 75% del tiempo los periodos son iguales o menores que 5 segundos, mientras, que el 1.4% del tiempo los periodos son mayores de 10 segundos".

“Para los oleajes generados fuera del área de observación, el 4% del tiempo la altura de ola es mayor o igual a 4.25m, y que la se presenta para oleajes entre 1.75 y 2.25 m de altura. El 22% del tiempo los periodos son menores o iguales a 5 segundos y el 7% del tiempo los periodos son mayores de 10 segundos”.

“Sobre la distribución de la dirección de las olas se concluye que el oleaje en el área considerada muestra más direcciones predominantes claramente concentradas entre el Norte y el Este, en el cuadrante entre 0° y 90° con una moda alrededor de los 60°. La tendencia direccional del oleaje es básicamente la misma para olas fuera o dentro del área de generación.”

“Por otra parte, el “U.S Navy Marine Climatic Atlas of the World”, volumen I(Revisión de 1.974), contiene información estadística mensual multianual del oleaje con base en observaciones de buques comerciales y mediciones de buques oceanográficos en un área mar afuera en el Caribe”.

Los periodos que presentan mayor porcentaje de ocurrencia para cada rango de alturas de las olas observadas se presentan en la tabla No 9, los porcentajes de ocurrencia de oleajes que fueron considerados relevantes en dicho estudio se presentan en la tabla No 10.

| TABLA No 9 | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| PERIODOS MAS FRECUENTES | |
| ALTURAS (m) | PERIODOS MAS FRECUENTES(s) |
| 0-0.5 | 6 |
| 1-1.5 | 6 |
| 2-2.5 | 6-7 |
| 3-3.5 | 8-9 |
| 4-5.5 | 8-9 |

Fuente: Obras de Protección del Anillo Vial de Cartagena Sector Cabecera del Aeropuerto - Calle 70.

1.993

| TABLA No 10. | |
|-------------------------------|------------------------|
| DIRECCIONES DEL OLEAJE | |
| DIRECCION | % DE OCURRENCIA |
| NE | 43.1 |
| N | 2.6 |
| NW | 0.6 |
| W | 0.4 |
| SW | 0.6 |
| S | 1.0 |
| OTRAS DIRECCIONES | 51.7 |

Fuente: Obras de Protección del Anillo Vial de Cartagena Sector Cabecera del Aeropuerto - Calle 70.

1.993

7.5.2 Analisis de oleaje mar afuera para el caribe colombiano con base la estadística del Global Waves Statistics

La última fuente que consultamos fue el documento "Global Waves Statistics" publicado por la British Maritime Technology Limited. En dicho libro la tierra está dividida en 102 áreas. En cada área fueron recolectados datos de viento y observaciones de oleaje. Esas observaciones fueron hechas a bordo de barcos mercantes. Los Capitanes (u oficiales de navegación) sobre un número preseleccionado de barcos son requeridos a hacer observaciones visuales de viento y condiciones de oleaje cada día. Esta observación es guardada, junto con la posición del barco en ese momento. Dicha información es enviada a un número de estaciones meteorológicas en todo el mundo, las cuales recolectan los datos, agrupándolos de acuerdo a su posición. A solicitud de esos institutos la British Maritime Technology Limited organizó un archivo de datos de computador con toda la información recolectada.

Todos los datos fueron procesados y examinados en su integridad. Para este propósito también se usaron las observaciones de viento. Obteniéndose como resultado una compilación bastante realista de datos de oleaje. Los datos son agrupados en las 102 áreas antes mencionadas y publicadas por la British Maritime Technology Limited en el libro "Global Waves Statistics". Sin embargo uno debe tener en cuenta que dichos datos fueron promediados sobre áreas relativamente grandes.

Por consiguiente la representatividad de dichos datos para áreas cerradas, donde es importante la influencia de olas locales generadas por el viento es bastante baja. Uno debería utilizar estos datos principalmente en costas abiertas, como en el caso de Bocagrande.

La estadística presentada en el "Global Waves Statistics" se derivó de un análisis hecho sobre un gran número de observaciones visuales de vientos y oleajes, usando un programa de computador llamado NMIMET. Este programa está basado en una técnica de análisis que utiliza las observaciones de viento para incrementar el realismo de la estadística de oleaje.

Los datos que utilizamos en el presente estudio corresponden al área 47 de la estadística antes descrita, dicho espacio aparece representado en la Figura No.16.

Los datos del sector 47 aparecen de la siguiente forma: una tabla general con las condiciones de oleaje que se pueden presentar a lo largo del año (período, altura, dirección y porcentaje de ocurrencia del evento) (TABLA 11) y 4 tablas adicionales con igual estructura relativas a 4 épocas del año: diciembre a febrero, marzo a mayo, junio a agosto y septiembre a noviembre.

FIGURA No.16 DIVISION DE AREAS DEL GLOBAL WAVES STATISTICS.

95.

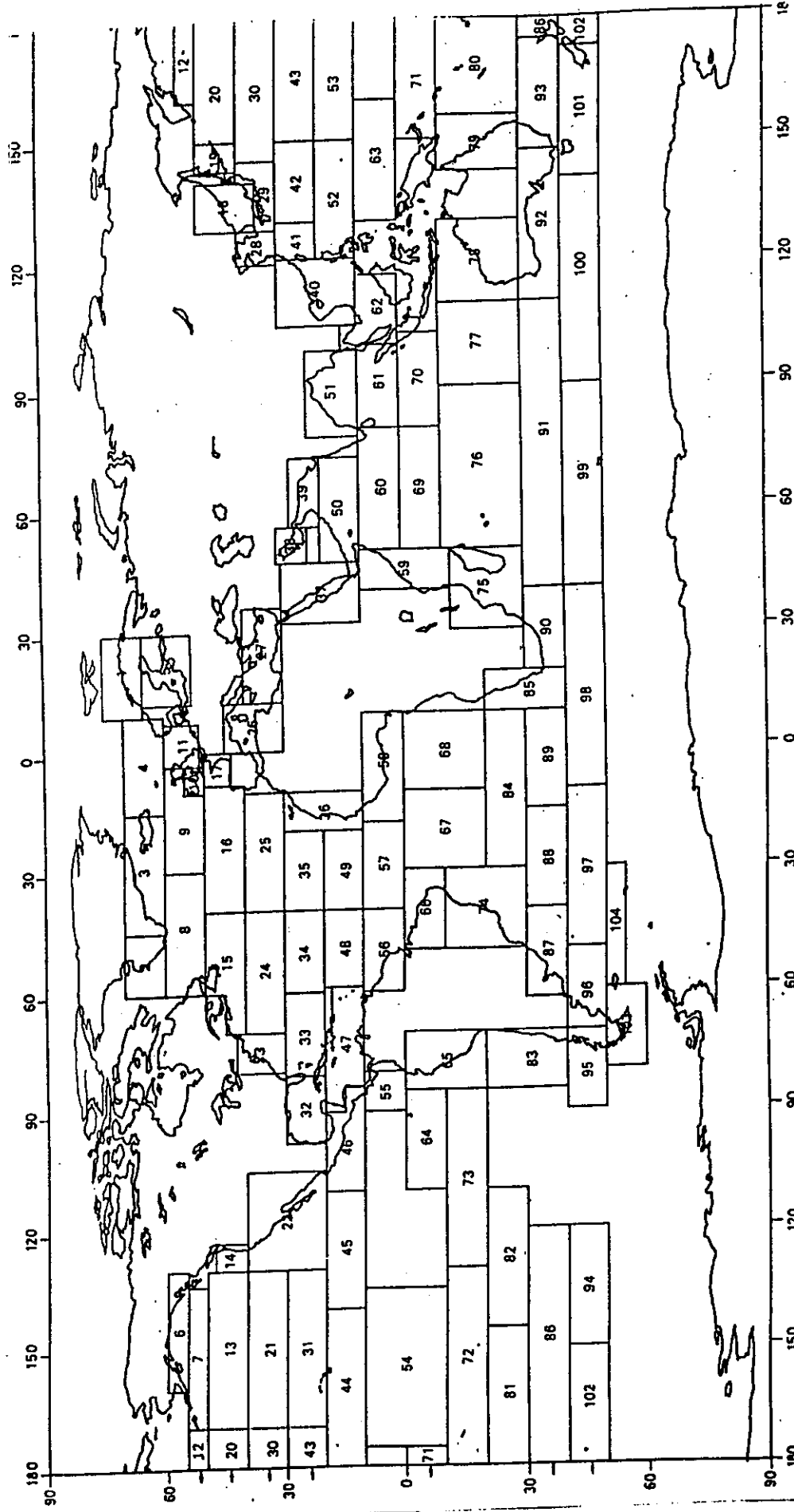


Fig. 8.1 Map of Area Subdivisions

24 Fuente: Global Waves Statistics. British Maritime Technology.

Esas tablas fueron obtenidas de la sistematización de 164.432 observaciones visuales de oleaje y viento correlacionadas con un archivo de 782.241 datos de viento.

Con base en esa información dentro del presente trabajo en conjunto con el trabajo de Tesis de Pedro Rejtman “Evaluación del comportamiento de la línea costera en el Anillo Vial entre la Calle No 70 – Cabecera de la Pista del Aeropuerto en el Barrio de Crespo” se hizo una sistematización de dicha información con miras a utilizarla dentro de los análisis a adelantar dentro de las zonas de estudio de cada proyecto de grado. Ambos trabajos están enmarcados dentro del proyecto “Estudio de la Línea de Costa de Cartagena de Indias” del Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental de la Universidad de Cartagena. La sistematización adelantada abarcó tres aspectos descritos a continuación:

7.5.2.1 Correlación de datos de periodo y altura

Como sabemos en todo listado estadístico de oleaje para una dirección dada a una misma altura de ola corresponden varios periodos posibles, dándose así origen a varios eventos diferentes.

Con base en los datos de Oleaje mar afuera anual de la G.W.S (Tabla 11) y utilizando una regresión de tipo exponencial, a través de un programa en Fortran desarrollado por uno de los asesores de esta tesis Ing. Jose Maria Horrillo en su Maestría en Ingeniería de Costas y Puertos se logro llegar a una correlación de datos de periodos y alturas de ola, para periodos redondos (Tablas No 13,15, 17 19 y 21) y para alturas redondas (Tablas No 12, 14, 16, 18 y 20).

99

TODAS LAS DIRECCIONES TABLA No 12

| PERIODO | ALTURA | PROB <= (%) | PROB >= (%) | P(<H<)(%) |
|----------|--------|-------------|-------------|-----------|
| 5,817304 | 1 | 11,89811189 | 88,11188811 | 11,8 |
| 6,723683 | 2 | 51,54845165 | 48,45154845 | 39,7 |
| 7,318008 | 3 | 82,41758242 | 17,58241758 | 30,9 |
| 7,771282 | 4 | 84,80519481 | 5,194805195 | 12,4 |
| 8,142118 | 5 | 98,5014985 | 1,498501499 | 3,7 |
| 8,458207 | 6 | 99,5004985 | 0,4995005 | 1 |
| 8,735013 | 7 | 99,8001988 | 0,1998002 | 0,3 |
| 8,882105 | 8 | 99,9000988 | 0,0999001 | 0,1 |

TODAS LAS DIRECCIONES No 13

| PERIODO | ALTURA | PROB <= (%) | PROB >= (%) | P(<H<)(%) |
|---------|--------|-------------|--------------|--------------|
| 4 | 0,2 | 0,989000889 | 98,0090889 | 1,009008027 |
| 5 | 0,5 | 9,390906391 | 90,609093609 | 8,425275827 |
| 6 | 1,2 | 54,06583407 | 45,93416593 | 24,77432287 |
| 7 | 2,5 | 84,93508484 | 15,064915156 | 30,989297984 |
| 8 | 4,6 | 88,01398801 | 11,986011989 | 21,16346047 |
| 9 | 8,1 | 96,5044985 | 3,495504988 | 9,528585757 |
| 10 | | 98,7012887 | 1,298701289 | 3,208628887 |
| 11 | | 99,8003988 | 0,199603002 | 0,902708124 |
| 12 | | 99,8001988 | 0,1998002 | 0,200601805 |
| 13 | | 99,9000989 | 0,0999001 | 0,100300903 |

OLEAJE NW, TABLA No 14

| CORRELACION | | % DIRECCIONAL | | |
|-------------|--------|---------------|--------------|-----------------|
| PERIODO | ALTURA | PROB >= (%) | P(<H<)(%) | P(<H<)(%) ANUAL |
| 4,828039 | 1 | 44,02360438 | 55,97639562 | 0,711805184 |
| 5,376528 | 2 | 13,04780878 | 86,95219122 | 0,393788834 |
| 5,724234 | 3 | 4,083665339 | 95,916334661 | 0,115868128 |
| 5,964648 | 4 | 1,494023904 | 98,505976096 | 0,032821236 |
| 6,194772 | 5 | 0,687211155 | 99,312788845 | 0,010128811 |
| 6,371921 | 6 | 0,368408376 | 99,631591624 | 0,003788804 |
| 6,526844 | 7 | 0,198203187 | 99,801796813 | 0,002532403 |
| 6,6818 | 8 | 0,098601584 | 99,901398416 | 0,001286201 |
| % ANUAL | 1,27 | | | |

OLEAJE NW, TABLA No 15

| CORRELACION | | % DIRECCIONAL | | |
|-------------|--------|---------------|-------------|-----------------|
| PERIODO | ALTURA | PROB >= (%) | P(<H<)(%) | P(<H<)(%) ANUAL |
| 4 | 0,3 | 26,78816815 | 73,21183185 | 0,340288924 |
| 5 | 1,3 | 85,47283882 | 14,52716118 | 0,492061753 |
| 6 | 4,1 | 89,25373134 | 10,74626866 | 0,302320717 |
| 7 | 11,1 | 97,41283532 | 2,587164678 | 0,1037251 |
| 8 | | 98,40298507 | 0,597014923 | 0,025288805 |
| 9 | | 98,80088502 | 0,199114978 | 0,005058761 |
| 10 | | 99,80048751 | 0,099512488 | 0,00128484 |

INSTITUTO DE HIDRAULICA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL
I.H.S.A

ANALISIS DE LAS TENDENCIAS DE EVOLUCION DE LA LINEA DE COSTA Y PROTECCION DE LAS PLAYAS DE BOCACRANDE. TRAMO ESPOLON RIBAREN-SECTOR EL LIMBO

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
MAURO MAZA CHAMORRO
TESIS DE GRADO

CORRELACION PERIODO-ALTURA ANUAL
TABLAS No 12, 13, 14 y 15

OLEAJE NE. TABLA No 16

| PERIODO | CORRELACION ALTURA | % DIRECCIONAL | | P(<H<)% ANUAL |
|----------|--------------------|---------------|------------|---------------|
| | | PROB >=(%) | P(<H<)% | |
| 5,727975 | 1 | 83,8481555 | 16,0678643 | 4,455618762 |
| 6,505536 | 2 | 45,663011 | 38,3233533 | 10,62706587 |
| 7,008432 | 3 | 18,5443669 | 27,1457086 | 7,52750499 |
| 7,368648 | 4 | 6,58025922 | 11,9760479 | 3,320958084 |
| 7,697714 | 5 | 2,28312064 | 4,25141717 | 1,19000988 |
| 7,959812 | 6 | 0,89730808 | 1,39720559 | 0,38744511 |
| 8,188363 | 7 | 0,39880359 | 0,499002 | 0,138373253 |
| 8,391641 | 8 | 0,19940179 | 0,1996008 | 0,055349301 |
| 8,575129 | 9 | 0,09970039 | 0,0998004 | 0,027674651 |
| % ANUAL | 27,73 | | | |

OLEAJE W. TABLA No 18

| PERIODO | CORRELACION ALTURA | % DIRECCIONAL | | P(<H<)% ANUAL |
|----------|--------------------|---------------|------------|---------------|
| | | PROB >=(%) | P(<H<)% | |
| 4,822906 | 1 | 42,1209118 | 57,9365079 | 0,58515873 |
| 5,371695 | 2 | 10,4063429 | 31,7460317 | 0,320634921 |
| 5,721226 | 3 | 1,98216058 | 8,43253968 | 0,085168651 |
| 5,982929 | 4 | 0,29732408 | 1,68650794 | 0,01703373 |
| 6,194139 | 5 | 0,09910803 | 0,1984127 | 0,002003968 |
| % ANUAL | 1,01 | | | |

OLEAJE NE. TABLA No 17

| PERIODO | ALTURA | % DIRECCIONAL | | | P(<H<)% ANUAL |
|---------|--------|---------------|------------|------------|---------------|
| | | PROB <=(%) | PROB >=(%) | P(<H<)% | |
| 4 | 0,2 | 1,69154229 | 98,3084577 | 1,6983017 | 0,4709939061 |
| 5 | 0,5 | 13,9303483 | 86,0696517 | 12,2877123 | 3,407382617 |
| 6 | 1,3 | 42,9850746 | 57,0149254 | 29,1708292 | 9,089070929 |
| 7 | 3 | 73,0348259 | 26,9651741 | 30,1698302 | 8,366983906 |
| 8 | 6,2 | 90,3482587 | 9,65174129 | 17,3826174 | 4,8201998 |
| 9 | 11,8 | 97,0149254 | 2,98507463 | 6,69330669 | 1,856053946 |
| | | 99,0049751 | 0,99502488 | 1,998002 | 0,554045954 |
| | | 99,5024876 | 0,49751244 | 0,4995005 | 0,138511489 |
| | | 99,60199 | 0,39800995 | 0,0999001 | 0,027702298 |

OLEAJE W. TABLA No 19

| PERIODO | ALTURA | % DIRECCIONAL | | | P(<H<)% ANUAL |
|---------|--------|---------------|------------|------------|---------------|
| | | PROB <=(%) | PROB >=(%) | P(<H<)% | |
| 4 | 0,4 | 28,1188119 | 71,8811881 | 28,1466799 | 0,284281467 |
| 5 | 1,3 | 66,5346535 | 33,4653465 | 38,4539148 | 0,388384539 |
| 6 | 4,1 | 89,7029703 | 10,2970297 | 23,1912785 | 0,234231913 |
| 7 | 11 | 97,5247525 | 2,47524752 | 7,82953419 | 0,079078295 |
| 8 | | 99,4059406 | 0,59405941 | 1,88305253 | 0,019018831 |
| 9 | | 99,8019802 | 0,1980198 | 0,39643211 | 0,004003964 |
| 10 | | 99,9009901 | 0,09900991 | 0,09910903 | 0,001000991 |

INSTITUTO DE HIDRAULICA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL
I.H.S.A.

ANALISIS DE LAS TENDENCIAS DE EVOLUCION DE LA LINEA DE COSTA Y PROTECCION DE LAS PLAYAS DE BOCA GRANDE. TRAMO ESPOLON RUBARREN-SECTOR EL LIMBO

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
MAURO MAZA CHAMORRO
CORRELACION PERIODO-ALTURA
TABLAS No 16, 17, 18 y 19

OLEAJE N. TABLA No 20

| PERIODO | CORRELACION | ALTURA | % DIRECCIONAL | | |
|----------|-------------|--------|---------------|--------------|---------------|
| | | | PROB >= (%) | P(<H>)(%) | P(<H>)(ANUAL) |
| 5,254383 | 1 | 65,8 | 34,23423423 | 1,297477477 | |
| 6,809108 | 2 | 25 | 40,84084084 | 1,547867868 | |
| 6,328448 | 3 | 7,4 | 17,61761762 | 0,687707708 | |
| 6,64582 | 4 | 1,8 | 5,60560506 | 0,208686869 | |
| 6,9017 | 5 | 0,5 | 1,401401401 | 0,063113113 | |
| 7,11824 | 6 | 0,2 | 0,3003003 | 0,0113811381 | |
| 7,366814 | 7 | 0,1 | 0,1001001 | 0,003763764 | |
| % ANUAL | 3,79 | | | | |

OLEAJE N. TABLA No 21

| PERIODO | ALTURA | % DIRECCIONAL | | |
|---------|--------|---------------|-------------|-----------------|
| | | PROB <= (%) | PROB >= (%) | P(<H>)(%) ANUAL |
| 4 | 0,2 | 8,184228858 | 90,84577114 | 8,2 |
| 5 | 0,8 | 38,4078802 | 61,5920388 | 29,4 |
| 6 | 2,2 | 71,74129353 | 28,25870647 | 33,5 |
| 7 | 5,5 | 90,84728368 | 9,452736318 | 18,9 |
| 8 | 12 | 97,21393035 | 2,786069652 | 6,7 |
| 9 | | 99,00497512 | 0,865024878 | 1,8 |
| 10 | | 99,40288507 | 0,697014923 | 0,4 |
| 11 | | 99,50248758 | 0,497512438 | 0,1 |

INSTITUTO DE HIDRAULICA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL

I.H.S.A

ANALISIS DE LAS TENDENCIAS DE EVOLUCION DE LA LINEA DE COSTA Y PROTECCION DE LAS PLAYAS DE BOCAGRANDE. TRAMO ESPOLON IBARREN-SECTOR EL LIMBO

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
MAURO MAZA CHAMORRO

CORRELACION PERIODO-ALTURA ANUAL

TABLAS No 20 y 21

7.5.2.2 Obtención del porcentaje de ocurrencia de cada evento.

Con base en el número de eventos dentro de cada grupo de datos se calculó a través de una hoja electrónica de Microsoft Excel 97 el porcentaje de ocurrencia de cada evento de oleaje particular, es decir para cada posible combinación de Periodos, alturas y direcciones de oleaje mar afuera anual. (Ver Tablas No12 al 21.)

La altura de 1mt es sobrepasada 88.1 % del tiempo, la de 2 mt el 48.45% del tiempo, la de 3mt un 17.58% y la de 5 mt solo un 1.5 % del tiempo, la ola de altura 8 mts es sobrepasada solo un 0.099%.

En cuanto a periodos el de 4 seg. es superado un 99 % del tiempo, el de 6 seg. el 65.93%, el de 8 seg un 13.98% y el de 9 seg un 4.49%.

En el Mar Caribe la dirección con mayor porcentaje de ocurrencia es la Este con 51.6%, le sigue el NE con 27.73%. De estos dos el más importante por la orientación de nuestra costa es sin duda el oleaje NE. Les siguen en porcentaje de ocurrencia los oleajes SE (9.72%), N(3.79%), NW(1.27%), S(2.15%), NW(1.27%), W(1.01%) y el más bajo corresponde al SW(0.99%).

Hablando específicamente de las características del oleaje NE podemos decir que a lo largo del año dentro de esta dirección la altura de 1 mt es superada un 83.94%, la de 2 mt un 45.6% y la de 8mts solo en un 0.2 %, en cuanto a periodos el de 5 seg es superado un

86.1% y el de 7 seg un 26.96%, el de 9seg lo es solo en un 2.98%.

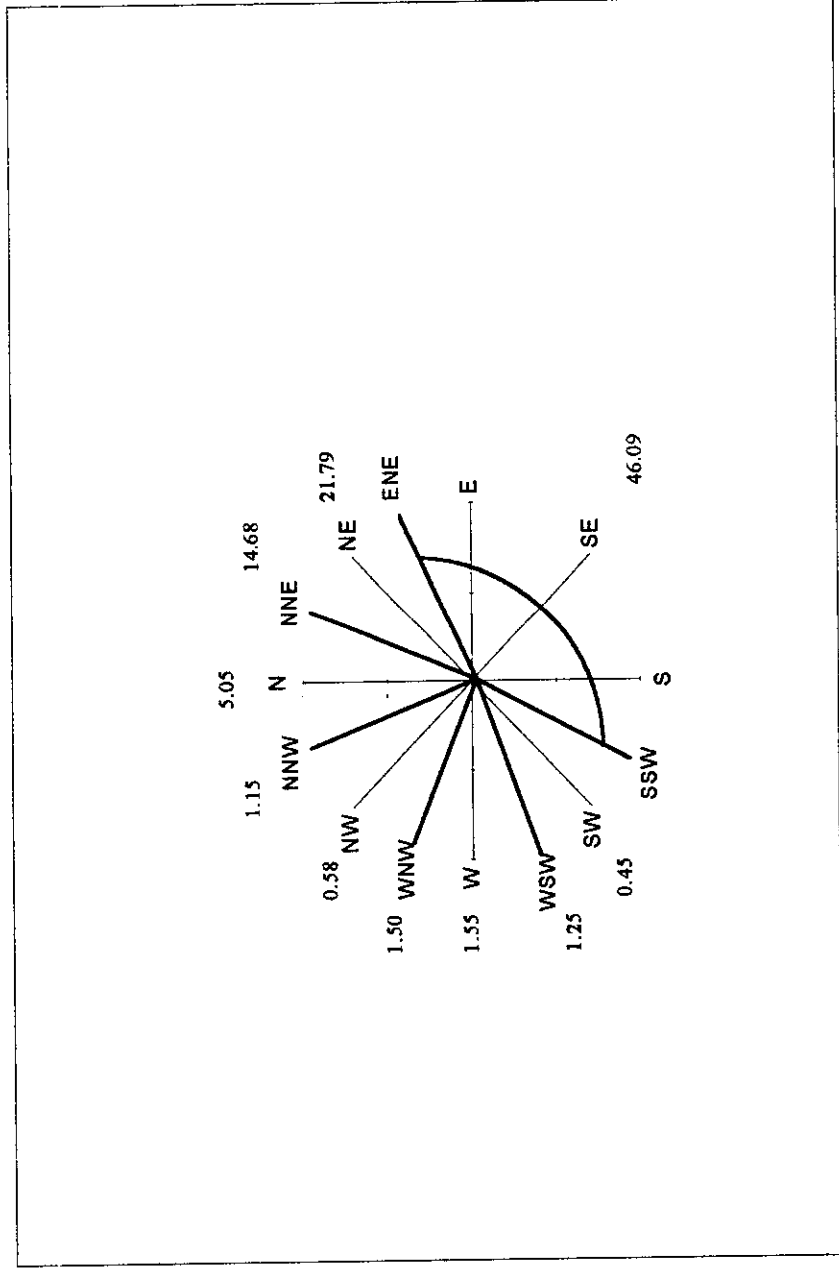
Las características específicas a nivel anual para cada dirección se pueden consultar en las tablas antes mencionadas.

7.5.2.3 Comparación entre los resultados del análisis de los datos de la G.W.S con los obtenidos en el trabajo “Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena” de el Laboratorio Central de Hidráulica de Francia en 1.972.

La distribución de oleajes por direcciones hechas por el LHF esta hecha cada 22.5° (Ver Figura No17) y la del G.W.S esta planteada cada 45° (ver Figura 18), con todo trataremos de correlacionar los porcentajes y examinar convergencias y divergencias.

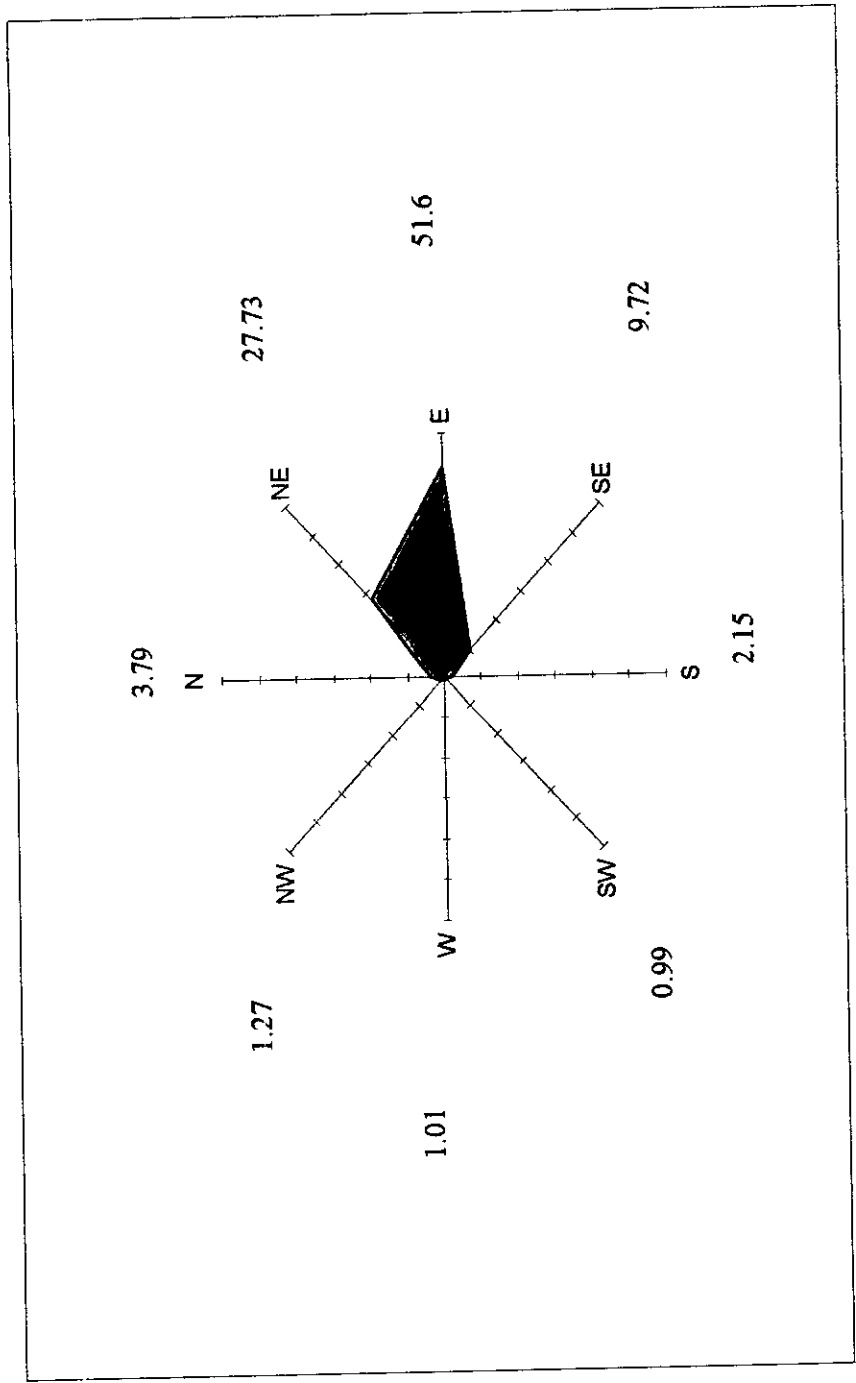
Según la rosa de oleajes del LHF el sector ENE-SSW tiene un porcentaje de ocurrencia anual de un 46.09 %, dicho rango en el estudio del G.W.S podemos asimilarlo a los oleajes E, SE y S que sumados nos dan un porcentaje de ocurrencia de 63.47 %, presentándose una diferencia apreciable.

FIGURA No.17. DISTRIBUCION PORCENTUAL DE DIRECCIONES DE OLEAJE EN EL CARIBE COLOMBIANO ESTUDIO DE PLAYAS EN LA BAHÍA DE CARTAGENA .LABORATORIO CENTRAL DE HIDRÁULICA DE FRANCIA 1.972.



Fuente: Datos del documento: Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena. Laboratorio Central de Hidráulica de Francia. 1.972.

FIGURA No.18. DISTRIBUCION PORCENTUAL DE OLEAJES EN EL AREA 47.
GLOBAL WAVES STATISTICS



Fuente: Global Waves Statistics. British Maritime Technology.

Si confrontamos las dos rosas considerando las direcciones restantes cada 45° encontraremos lo siguiente: Hay similitud entre los porcentajes de ocurrencia de los oleajes NE (21.79% según el LHF y 27.73% según el G.W.S), así como entre los oleajes N y W. Se presentan diferencias apreciables entre los valores atribuidos a los oleajes NW y SW. Las variaciones en dichos porcentajes de ocurrencia eran de esperarse, ya que el estudio del LHF corresponde a datos de oleaje generados con una estadística de vientos que se extendió hasta 1.971, los datos del G.W.S al ser más frescos, deben diferir en cuanto a porcentajes de ocurrencia, ya que el clima de oleaje no es estático.

La principal diferencia entre los dos estudios viene marcada por los métodos usados para cada análisis, y el origen de los datos : la correlación de periodos y alturas hecha por el LHF se obtuvo a partir de la aplicación del método de Breischneider sobre datos de viento y la correlación presentada en el presente trabajo fue producto de la aplicación de una regresión estadística tipo exponencial sobre datos de observaciones visuales compiladas dentro de la publicación G.W.S.

Mientras no se hagan mediciones sistemáticas de oleaje en el Mar Caribe tendremos que recurrir a las fuentes y los análisis hasta ahora mencionados, teniendo en cuenta las limitaciones que impone cada tipo de aproximación. Queremos dejar claro que la única razón que tenemos para preferir nuestra sistematización hecha con datos del G.W.S a otras fuentes es la gran extensión en el tiempo de las observaciones visuales de oleaje y viento hechas para elaborar el documento de la G.W.S y la actualización que de estos datos hace la

British Maritime Technology regularmente.

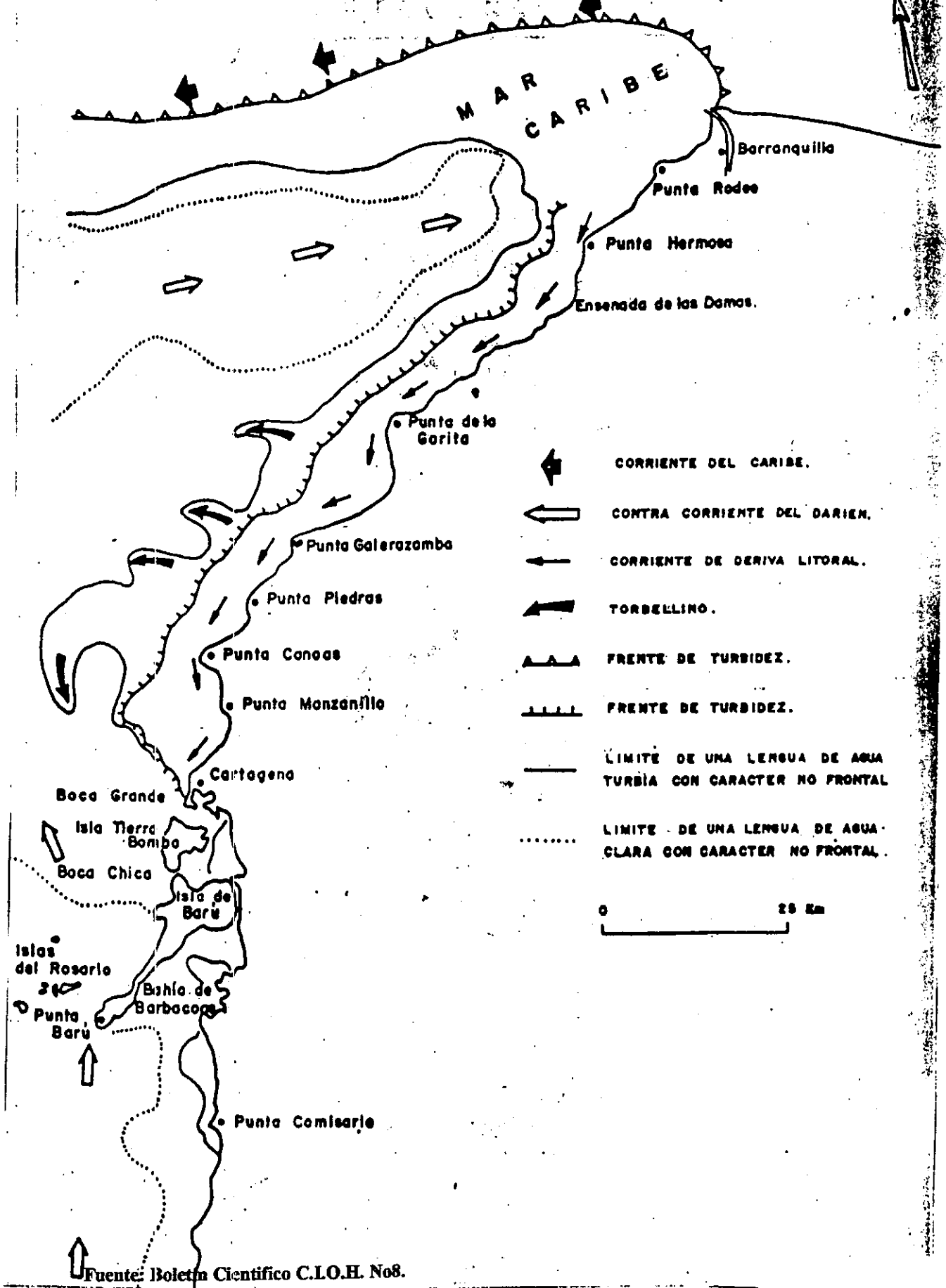
Como punto en contra de los datos del G.W.S el más fuerte es el hecho de que sean tan genéricos, ya que corresponden a todo el Caribe.

7.6 CORRIENTES

Como se señala en el estudio: "Protección y Recuperación de las Playas de El Laguito" de 1.994 , existen estudios apropiados sobre los patrones de corrientes que prevalecen en la costa Caribe Colombiana y en la Bahía de Cartagena. En la Figura No 19 se presentan las diferentes corrientes que componen la hidrodinámica y la trayectoria de los sedimentos en suspensión a partir de la desembocadura del río Magdalena. Este trabajo elaborado por Carlos Andrade y Yves F. Thomas (Boletín No 8 CIOH) presenta los parámetros enunciados a través del análisis de imágenes del satélite Spot.

Dentro de la Bahía de Cartagena existen también patrones elaborados y comprobados de la circulación de sus aguas en época de lluvias y tiempo seco.

FIGURA No.19. CORRIENTES Y TRAYECTORIA DE SEDIMENTOS A PARTIR DE LA DESEMBOCADURA DEL RIO MAGDALENA.

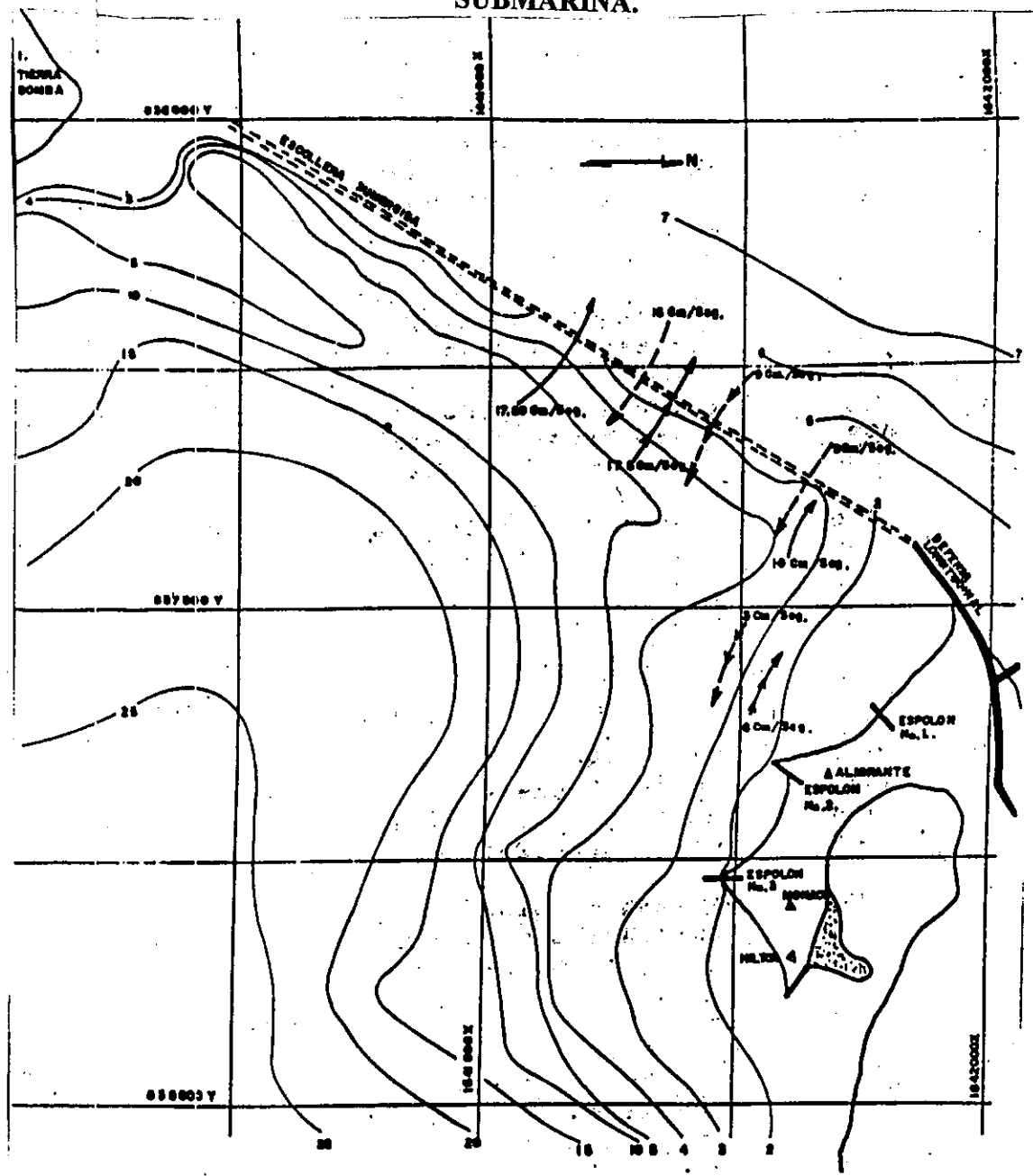


Las corrientes que entran y salen por Bocagrande a través de la escollera son las de las mareas en sus diferentes periodos y una lengua de la contracorriente del Darién que penetra hasta la mitad de la Bahía interna durante todo el año. Como la profundidad de la Escollera es de 1.5 mts promedio, la corriente calculada a este nivel se considera de carácter superficial.

Los datos anotados en la Figura No 20 corresponden a dos épocas separadas por 25 años donde se aprecia que el rango promedio de velocidad de la corriente asociado a la marea sobre la parte central de la escollera es de 17.5 cm/seg en reflujo y 16 cm/seg subiendo la marea. Dentro de la Bahía las corrientes oscilan entre los 0.3 y 10 cm/seg.

En el periodo de lluvias o de vientos del sur, la pluma de turbidez generada por el Canal del Dique alcanza los sectores del Laguito, la cual por su carácter contaminante en materia orgánica y lodos afecta las aguas y fondos aledaños al sector de estudio.

FIGURA No.20. REGIMEN DE CORRIENTES EN LA ESCOLLERA SUBMARINA.



VELOCIDAD PROMEDIO CORRIENTES SUPERFICIALES ESCOLLERA Y LAGUITO

- ESCALA: 1:10-000
- B. SCHAU (1974)
- MAREA SALIENDO
- MAREA ENTRANDO
- GIGN. (1960)
- MAREA SALIENDO
- MAREA ENTRANDO

Fuente: Protección y recuperación de las playas del Laguito. 1.994.

De este capítulo podemos resumir como conclusiones para el estudio lo siguiente:

-De todos los parámetros oceanográficos antes analizados el de más preponderancia es el de oleaje, ya que es su accionar de acuerdo a la base teórica de este estudio el que genera el transporte de sedimentos que repercute en variaciones en la línea de costa.

-La influencia de la marea es con relación al oleaje despreciable, pero como se dijo anteriormente debe tenerse en cuenta su efecto sobre la ola generada cuando hay mar de leva.

-En cuanto a las corrientes es un factor de suma importancia la corriente de deriva litoral que existe entre la desembocadura del Río Magdalena y la zona de estudio, ya que parte de los sedimentos que circulan hacia la zona de estudio forman parte de este proceso como se describirá con más detalle en el análisis de migración de arenas hacia el sector de Bocagrande.

-Es de vital importancia que en nuestro país se comience a hacer medición de oleaje en aguas profundas y que dicha información se vincule a los bancos de datos de los centros meteorológicos de el Caribe colombiano.

La medición de dicho parámetro permitirá una vez pasado cierto tiempo elaborar una estadística lo suficientemente consistente para sostener estudios de transporte litoral, variación en la línea de costa y protección de playas entre otros, así como correlacionar e integrar los datos meteorológicos relativos al Caribe colombiano para dar un paso más en el conocimiento de uno de nuestros más importantes recursos: el Mar.

8. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente estudio se siguió la siguiente metodología, inspirada en el actual estado del arte de la Hidráulica Marítima y la Ingeniería de Costas, así como los estudios previos realizados sobre el litoral de Cartagena de Indias.

8.1 RECOPIACION DE INFORMACION

8.1.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN BIBLIOGRAFICA.

Relacionamos a continuación las Instituciones que fueron en este estudio importantes fuentes de consulta :

Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental (a través del cual se hicieron las consultas a las demás entidades), Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (C.I.O.H), Dirección Nacional Marítima (DIMAR), IDEAM, I.G.A.C, archivos del antiguo Ministerio de Obras Publicas y Transportes, EDURBE, Oficina de Valorización Distrital, entre otras.

A nivel de información hidrodinámica, sedimentologica, topográfica, batimétrica e histórica del sector consideramos de vital importancia los 3 estudios citados en los antecedentes de este trabajo: “ Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena”. (Laboratorio Central de

Hidráulica de Francia. 1.972), “Recuperación de las Playas de Bocagrande en Cartagena”, y “Análisis de la Evolución de las Playas de Bocagrande y El Laguito”, (Laboratorio de Ensayos Hidráulicos del Ministerio de Obras Publicas y Transporte.1.983 y 1.989 respectivamente).

En cuanto a información estadística de oleaje fue fundamental para este estudio la publicación Global Wave Statistics, compilada y editada por British Maritime Technology Limited.

En cuanto a metodología de modelación los manuales del Shoreline Modeling System. S.M.S fueron nuestro punto de partida y guía de camino.

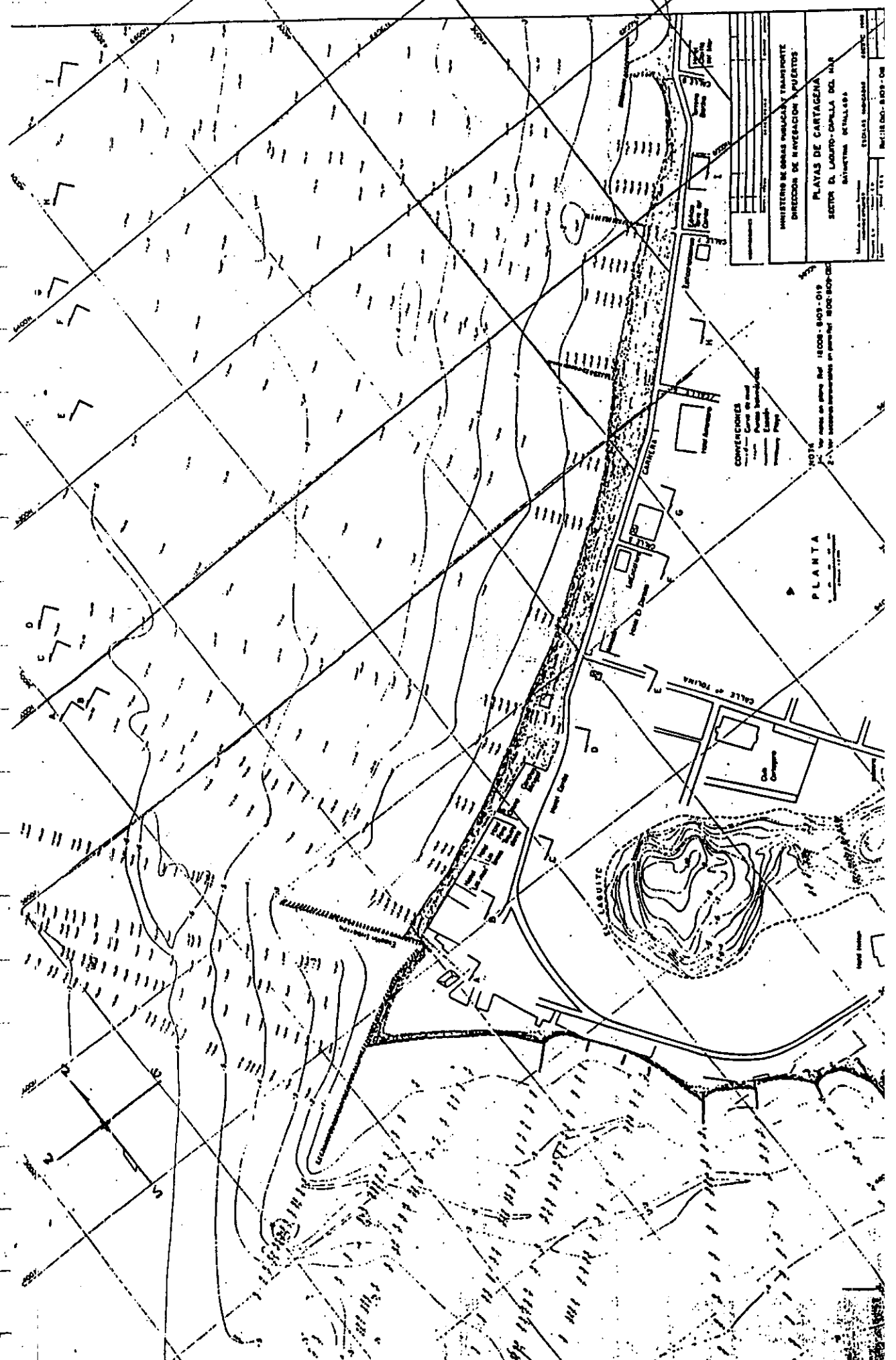
8.1.2 Recopilacion de datos de campo existentes .

8.1.2.1 Planos topograficos y batimetricos.

Se utilizaron planos topográficos y batimetricos del tramo comprendido entre el Espolón Iribarren y el Sector El Limbo, las batimetría y líneas de costa a utilizadas se obtuvieron del Plano batimetrico de Bocagrande 1.988 del Ministerio de Obras Publicas y Transporte (Figuras No 21 y 22) y de Plano batimetrico de Bocagrande de 1.996 realizado por el Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental de la Universidad de Cartagena (Figuras 23 y 24).

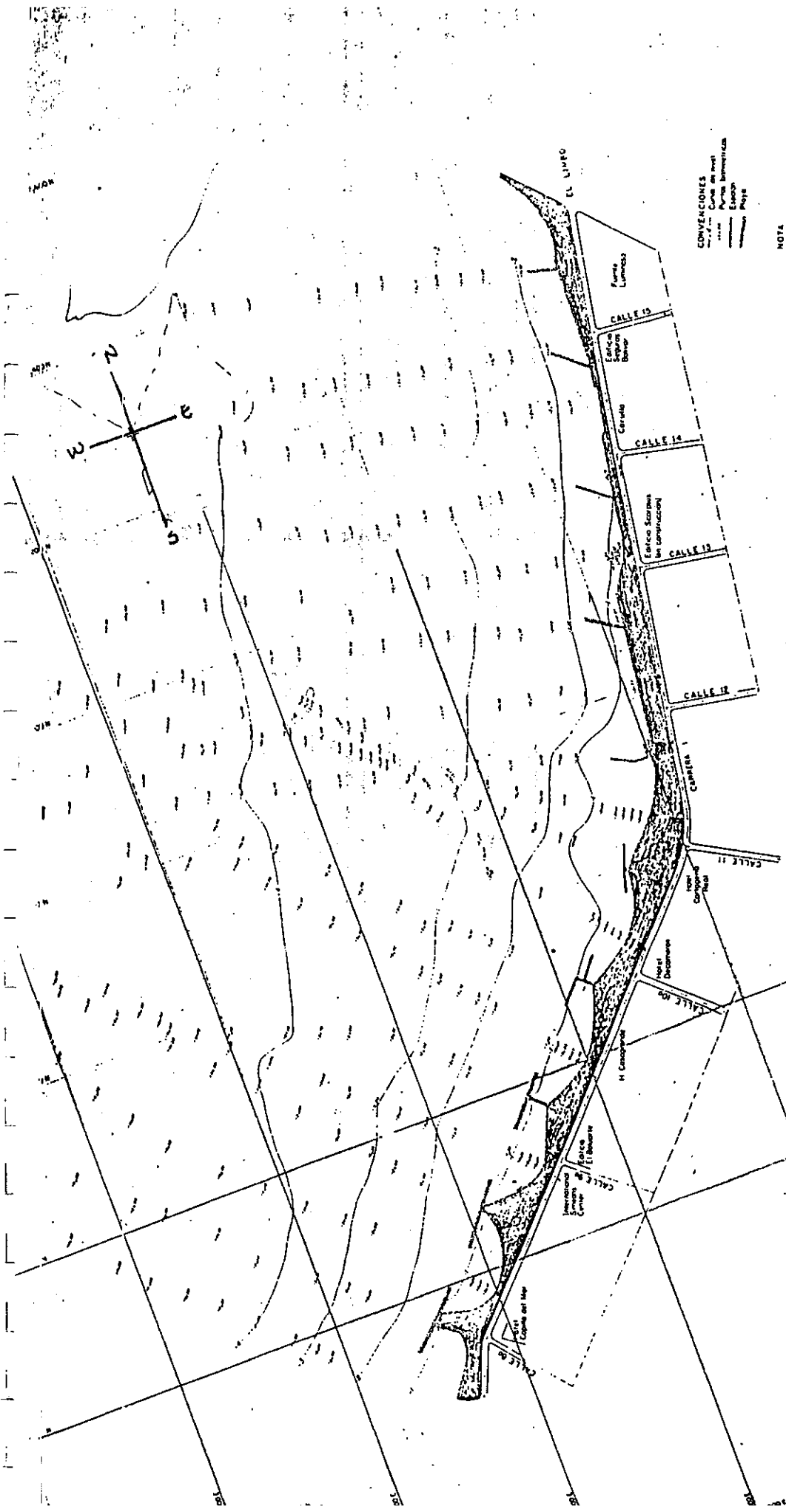
119

FIGURA No 21. SECTOR EL LAGUITO-CAPILLA DEL MAR. BATIMETRIA DETALLADA. 1.988.



113

FIGURA No.22. SECTOR CAPILLA DEL MAR-EL LIMBO. BATIMETRIA DETALLADA. 1.988.



CONVENCIONES
 --- Contorno
 --- Puntos Batimetricos
 --- Estacion
 --- Playa

NOTA
 1. Ver notas en plano Ref. 18000-809-019

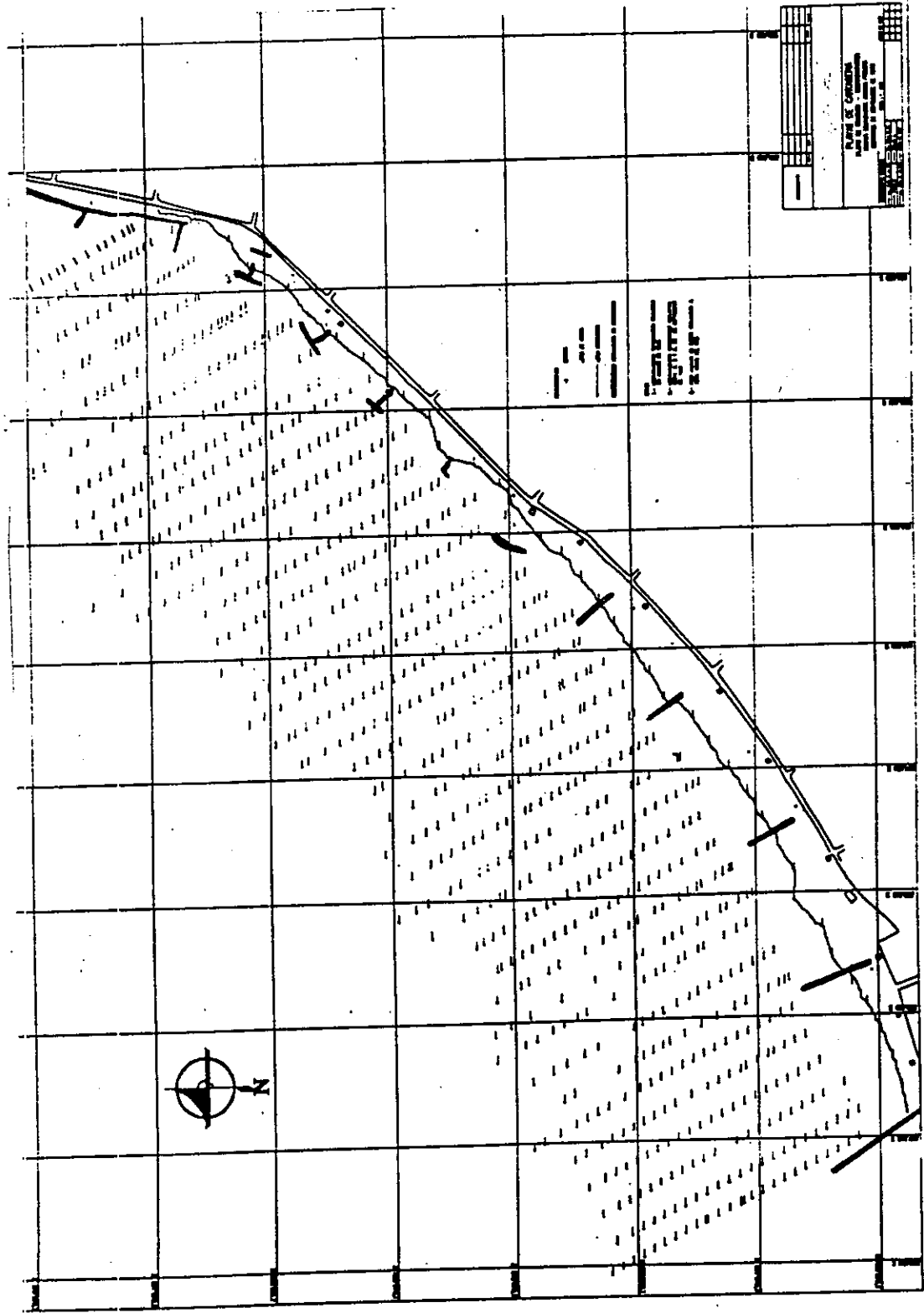
Fuente: Analisis de la evolucion de las playas de Bocagrande y El Laguito. Ministerio de Obras Publicas y Transportes. 1.989.

PLANTA

| |
|--|
| MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y TRANSPORTES DIRECCION DE NAVEGACION Y PUERTOS PLAYAS DE CARTAGENA SECTOR CAPILLA DEL MAR-EL LIMBO BATIMETRIA DETALLADA 18000-809-019 |
|--|

116

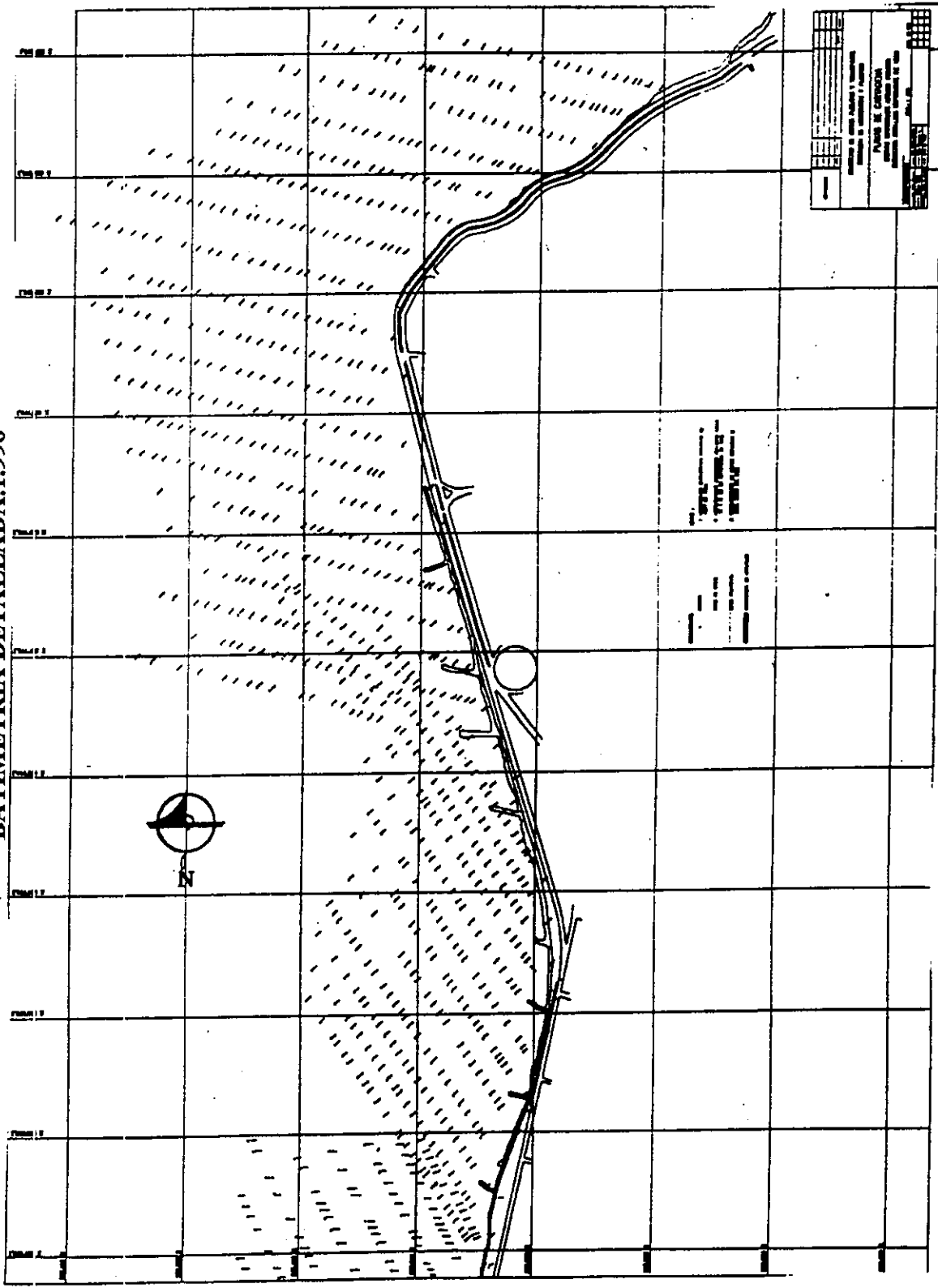
FIGURA No.23. TRAMO ESPOLON IRIBARREN-CALLE 13 EN BOCAGRADE. BATIMETRIA DETALLADA.
1.996



Fuente: Plano batimétrico Tramo espolón Iribarren-Calle 13 en Bocagrade. Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental. 1.996

117

FIGURA No.24. TRAMO CALLE 13 EN BOCAGRANDE-SECTOR SANTO DOMINGO.
BATIMETRIA DETALLADA.1.996



Fuente: Plano batimétrico Tramo Calle 13 en Bocagrande-Sector Santo Domingo. Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental. 1.996

8.1.2.2 Muestreo sedimentológico.

Se utilizaron muestras de arena recogidas por el personal del Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental. Dichas muestras fueron recogidas sobre la línea de costa a lo más cerca cada 100mt. A partir de cada punto seleccionado sobre la costa se tomaron muestras avanzando hacia el mar desde la profundidad 0.0 mt hasta 1.5 mt. Estos puntos de muestreo fueron referenciados con el fin de saber cual es la distribución espacial de los diferentes tipos de arena en el sector. Las muestras fueron conservadas en bolsas plásticas referenciadas hasta su ensayo granulométrico. En total dicho muestreo abarcó 25 perfiles perpendiculares a la playa, cada uno con 4 muestras en promedio, para un total de 96 muestras.

8.2 ANALISIS PREVIOS A LA MODELACION.

8.2.1 Analisis granulométrico.

Se hizo el análisis granulométrico de las muestras recolectadas siguiendo la norma E 16-57 del M.O.P.T (antiguo Ministerio de Obras Publicas) para conocer en cada muestra: granulometría, clasificación, D50 y D90. De las 96 muestras existentes solo pudieron ser evaluadas 73 de ellas, siendo sin embargo esto suficiente para los objetivos fijados.

El valor de D50 y D90, así como el porcentaje pasa 200 de cada muestra se presenta en la Tabla No. 22.

Los valores de D50 están entre 0.11 mm y 0.23 mm y los de D90 tienen un rango de 0.17 a 0.8 mm.

El valor promedio de D50 para el sector fue calculado sobre las 73 muestras antes mencionadas y fue fijado en 0.142 mm, el D90 promedio correspondió al valor 0.318 mm y el porcentaje medio Pasa 200 fue 1.72%.

Los anteriores resultados parecen estar de acuerdo con el estudio “Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y El Laguito” de 1.989 del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos en el que se precisa : “las playas de Bocagrande, están compuestas por arenas finas cuyo D50 es en promedio 0.15 mm”.

Un dato obligatorio de entrada al modelo matemático que utilizaremos es el D50 de las arenas del sector evaluado, de ahí que el promedio de los D50 de todas las muestras sea un dato muy importante.

120

| JESTRA | D50 | D90 | % PASA 200 | MUESTRA | D50 | D90 | % PASA 200 |
|--------|-------|------|------------|----------|------------|------------|------------|
| 1 | 0,13 | 0,3 | 1,47539972 | 52 | 0,17 | 0,36 | 0,98134021 |
| 2 | 0,12 | 0,17 | 3,47297893 | 53 | 0,13 | 0,3 | 0,9687466 |
| 4 | 0,12 | 0,22 | 2,03211119 | 54 | 0,22 | 0,37 | 0,99533028 |
| 5 | 0,12 | 0,18 | 2,61288212 | 55 | 0,145 | 0,35 | 0,99812118 |
| 7 | 0,12 | 0,2 | 1,71176146 | 56 | 0,15 | 0,35 | 0,9375 |
| 9 | 0,16 | 0,35 | 1,68099331 | 57 | 0,13 | 0,3 | 1,68951408 |
| 11 | 0,12 | 0,24 | 1,99661268 | 58 | 0,12 | 0,28 | 1,31523618 |
| 13 | 0,13 | 0,31 | 0,91428571 | 59 | 0,155 | 0,35 | 1,20044731 |
| 17 | 0,12 | 0,29 | 3,02866692 | 60 | 0,14 | 0,37 | 1,537972 |
| 18 | 0,13 | 0,31 | 1,38618677 | 61 | 0,13 | 0,3 | 1,52721984 |
| 19 | 0,11 | 0,17 | 1,73691697 | 62 | 0,17 | 0,34 | 2,03734859 |
| 20 | 0,12 | 0,27 | 1,64612838 | 63 | 0,145 | 0,34 | 1,81075536 |
| 21 | 0,11 | 0,2 | 1,7600151 | 64 | 0,14 | 0,34 | 2,92179346 |
| 22 | 0,14 | 0,34 | 2,01333992 | 65 | 0,13 | 0,3 | 1,25550067 |
| 23 | 0,125 | 0,28 | 1,94887697 | 66 | 0,165 | 0,35 | 0,27284137 |
| 24 | 0,125 | 0,28 | 1,7973982 | 67 | 0,12 | 0,3 | 1,09803146 |
| 25 | 0,135 | 0,34 | 1,40575825 | 68 | 0,17 | 0,38 | 0,93387416 |
| 26 | 0,14 | 0,33 | 0,58782302 | 69 | 0,16 | 0,35 | 3,03076654 |
| 27 | 0,12 | 0,29 | 2,23174433 | 70 | 0,2 | 0,36 | 1,76080184 |
| 28 | 0,12 | 0,26 | 1,11735397 | 71 | 0,14 | 0,34 | 2,376262 |
| 29 | 0,12 | 0,3 | 2,5956753 | 72 | 0,19 | 0,4 | 1,33788625 |
| 30 | 0,18 | 0,35 | 1,01433076 | 73 | 0,13 | 0,32 | 1,75527016 |
| 31 | 0,12 | 0,27 | 1,85808211 | 74 | 0,13 | 0,32 | 1,78422291 |
| 32 | 0,12 | 0,25 | 1,58930319 | 75 | 0,21 | 0,5 | 1,77829933 |
| 33 | 0,13 | 0,32 | 1,86369079 | 77 | 0,23 | 0,8 | 2,11879754 |
| 35 | 0,135 | 0,3 | 1,31714286 | 80 | 0,12 | 0,3 | 3,46059469 |
| 36 | 0,145 | 0,26 | 1,76231557 | 81 | 0,12 | 0,28 | 0,86372933 |
| 37 | 0,135 | 0,25 | 1,16993819 | 82 | 0,12 | 0,3 | 1,94274356 |
| 39 | 0,13 | 0,33 | 0,76454708 | 83 | 0,12 | 0,3 | 1,8634882 |
| 41 | 0,14 | 0,34 | 1,19583258 | 85 | 0,13 | 0,33 | 2,24242827 |
| 42 | 0,18 | 0,35 | 1,24831119 | 86 | 0,13 | 0,33 | 1,83371998 |
| 44 | 0,14 | 0,35 | 1,10479798 | 88 | 0,11 | 0,2 | 2,45903244 |
| 46 | 0,16 | 0,35 | 1,66724328 | 91 | 0,2 | 0,4 | 1,2506697 |
| 47 | 0,12 | 0,32 | 3,08857143 | 92 | 0,13 | 0,28 | 1,84790077 |
| 49 | 0,145 | 0,35 | 1,13015199 | 93 | 0,13 | 0,26 | 5,82205742 |
| 50 | 0,23 | 0,37 | 1,11070179 | 95 | 0,14 | 0,4 | 1,71906458 |
| 51 | 0,14 | 0,36 | 1,12695681 | PROMEDIO | 0,14184932 | 0,31780822 | 1,72457719 |

| | |
|---|-------------------------|
| INSTITUTO DE HIDRAULICA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL | |
| I.H.S.A | |
| "ANALISIS DE LAS TENDENCIAS DE EVOLUCION DE LA LINEA DE COSTA Y PROTECCION DE LAS PLAYAS DE BOCAGRANDE TRAMO ESPOLON IRIBARREN-SECTOR EL LIMBO" | |
| UNIVERSIDAD DE CARTAGENA | |
| MAURO MAZA CHAMORRO | |
| TESIS DE GRADO | ANALISIS GRANULOMETRICO |
| TABLA No 22 | |

8.2.2 Análisis de distribución sedimentológica.

Una vez hecho el análisis granulométrico, teniendo en cuenta los parámetros D50 y D90 de las muestras y los sectores de donde fueron tomadas se procedió a hacer un análisis de la distribución espacial de dichos valores en la zona de estudio.

En cuanto al D50 (para referencia espacial ver Figuras 21 y 22), hay abundancia de valores comprendidos entre 0.12 mm y 0.13 mm en el sector comprendido entre la Calle 6° y el Espolón Iribarren. Este sector en el año de 1.990 fue rellenado con arenas dragadas del sector El Laguito en donde el D50 promedio es de 0.12 mm.

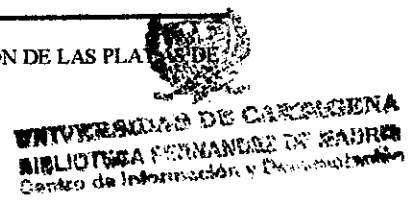
Se hacen más comunes los valores entre 0.13 mm y 0.14 mm en la zona comprendida entre la calle 7° y la calle 10°. Hay una gran variedad de valores comprendidos entre 0.12 y 0.23 entre la calle 10° y la calle 14°. De la calle 15° hacia el Norte paralelos a la Avenida Santander encontramos una gran abundancia de valores de 0.12 y 0.13 mm, en incluso valores de 0.11 y 0.14 mm.

Es interesante anotar que a lo largo de toda la zona los valores de D50 más altos tienden a agruparse en la línea de costa sobre la parte seca de la berma, lo anterior concuerda con la siguiente apreciación que extractamos del estudio "Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y El Laguito" de 1.989 del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos: " el material de la berma y de la parte superior de la cara de la playa, en general es uno de los sectores

del perfil de una playa donde el material es más grueso, puesto que ha sido depositado allí por los grandes oleajes de tormenta que se desplazan sobre la cara de la playa”.

El valor de D50 promediado solo sobre las muestras de la línea de costa asciende a 0.17 mm, resultando ser mayor que el D50 promediado sobre todas las muestras que es de 0.142 mm, ratificándose lo anterior .

En cuanto a los valores de D90 (ver figuras 21 y 22 para referencia espacial) ,entre el Espolón Iribarren y la Calle 5° hay abundancia de valores entre 0.22 mm y 0.33 mm. Entre la calle 5° y la Calle 11° hay primacía de los valores entre 0.3 mm y 0.38 mm. Entre la calle 12 y la calle 15 encontramos valores más altos, aunque es difícil estimar allí una tendencia ya que pocas muestras se evaluaron de ese sector. De la calle 15 hacia el Norte siguiendo la Avenida Santander son comunes los valores entre 0.28 mm y 0.33 mm.



8.2.3 Comportamiento de la línea de costa y análisis de las estructuras

Como adelantamos en la descripción del área de estudio, Bocagrande es una espiga o flecha litoral, que se extiende desde la Punta Santo Domingo con dirección Noreste-Suroeste rematando su sector de playas con cara a mar abierto con el Espolón Iribarren frente al Hotel Las Velas.

Como mencionamos en la sección de antecedentes, los cambios más importantes del Sector de Bocagrande entre 1.952 y 1.988 fueron:

Los espolones que la Andian construyó en 1.952 produjeron inicialmente un avance en el sector Norte y un notorio retroceso en el sector Sur, al punto que en 1.955 fue necesario construir un muro de protección de las instalaciones del Hotel Caribe. Posteriormente en 1.961 la línea de playa avanzó en todo el sector, siendo mayor el incremento en el sector Norte.

A partir de 1.965, el Espolón Iribarren produjo un avance de las playas en toda la zona, principalmente en el sector Sur donde entre 1.967 y 1.983 el incremento fue de 60 mt aproximadamente. Con respecto a 1.950, en 1.983 las playas en cercanías de este espolón habían avanzado unos 100 mt.

A partir de 1.983, año en que se amplía la Avenida Primera de Bocagrande en el tramo del Hotel Caribe al Hotel Capilla del Mar y se construyeron los espolones de protección de la misma, se presentó un notorio retroceso en el sector Sur de las playas y un avance también notorio en el Norte, en medio de los nuevos espolones. Es de anotar que además de estas obras, al Norte del Hotel Capilla del Mar se habían construido varios espolones en T que crearon playas en un sector donde eran inexistentes.

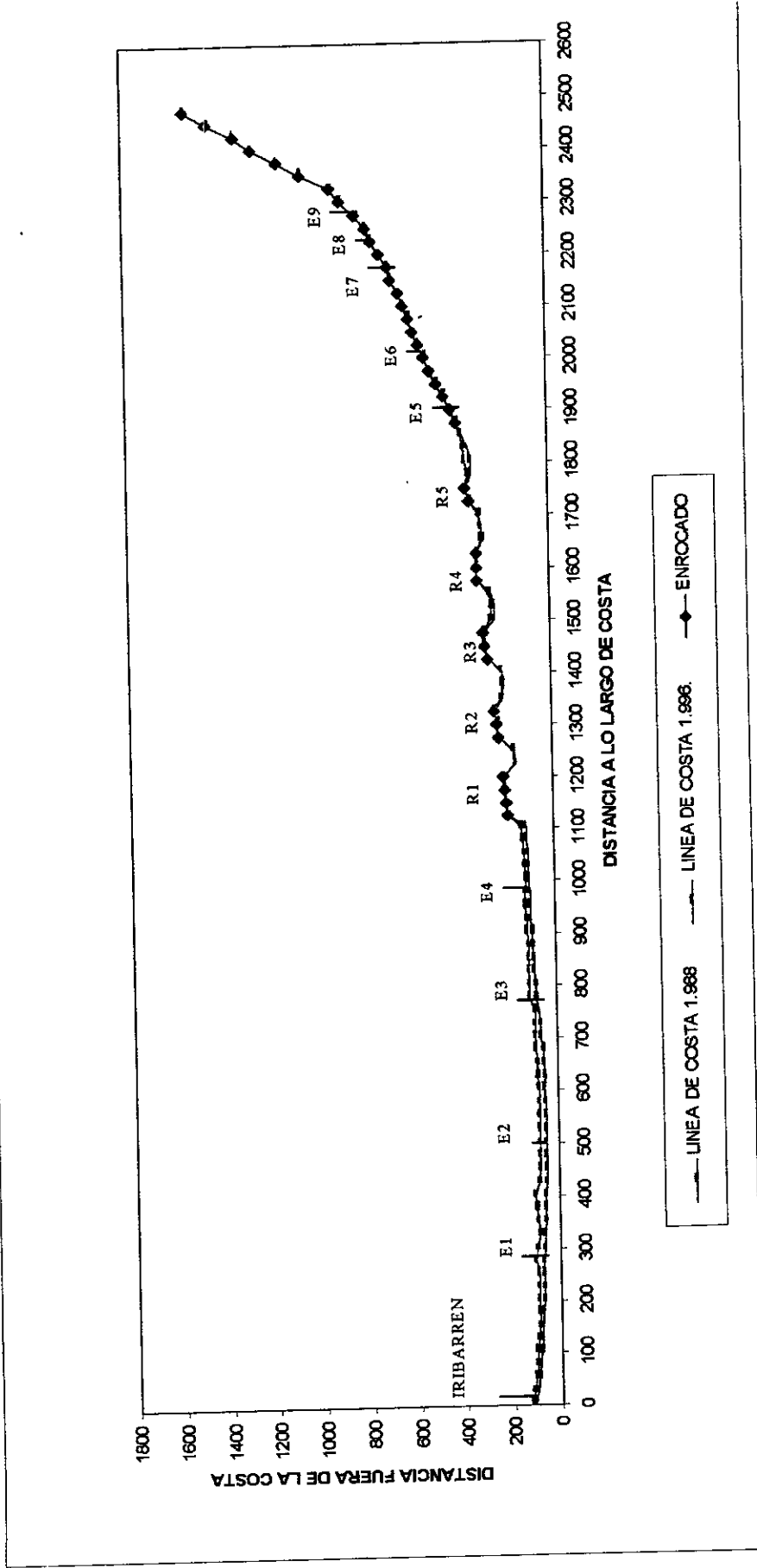
Entre febrero de 1.988 y abril de 1.989, periodo que comprende el paso del Huracán Joan, continua la tendencia descrita en el párrafo anterior siendo más notorio el incremento de las playas entre los espolones construidos en el sector Norte que el retroceso en el Sur.

Con respecto a la línea de playa que existía en 1.950, la cual puede considerarse como representativa del estado de equilibrio natural puesto que en esa época no se había construido ninguna clase de estructuras, la línea de costa de 1.989 representa un avance de unos 40 mt en el sector Sur y de unos 70 mt en el sector Norte.

En cuanto a las variaciones en la línea de costa entre 1.988 y 1.996 (Ver figura 25), es importante mencionar los rellenos realizados en el año 1.991 entre el Espolón Iribarren y el Hotel Americano, así como la construcción de los espolones E1 y E2, frente al Hotel Caribe y entre la Calle 4ª y 5ª respectivamente para retener dicho relleno. Dichas obras se adelantaron con el fin de contrarrestar los fuertes procesos erosivos presentes entre el espolón Iribarren y el Hotel Caribe.

125.

FIGURA No.25. COMPORTAMIENTO DE LA LINEA DE COSTA.1.988-1.996 Y ESTRUCTURAS DE PROTECCION.



Lo que más salta a la vista es el gran avance de la línea de costa en el sector comprendido entre el espolón Iribarren y el Hotel Capilla del Mar , sobre todo entre el espolón E1 y la Calle 6ª , donde se pueden apreciar diferencias entre las líneas comparadas en el orden de los 30 a los 40 mts. Entre el espolón Iribarren y el espolón E1 se produjo un avance de unos 20 mts en promedio, así como entre la Calle 6ª y el Hotel Capilla del Mar . Estos avances fueron posibles gracias al relleno ya mencionado.

Las otras estructuras como el espolón E3 frente a la Calle 6ª, el espolón E4 frente a la Calle 7ª datan de trabajos realizados para la protección de la Avenida Primera de Bocagrande cuando esta fue ampliada entre el Hotel Caribe y el Hotel Capilla del Mar en 1.983.

Entre la Calle 8ª y la Calle 9ª no se presentó variación significativa en los últimos 8 años. Entre la Calle 9ª y la Calle 11 se presentaron avances entre los 10 y los 20 mts. Las cinco estructuras en T ubicadas entre la Calle 8ª y la Calle 11 presentan formaciones tipo tombolo, bastante desarrolladas y cierto nivel de deterioro. Entre la Calle 11 y el Sector El Limbo no se ha presentado ninguna variación ya que la evolución de ese tramo esta restringida por un muro. Los espolones entre la Calle 11 y el Sector el Limbo presentan deterioro en su cuerpo y sus puntas, siendo además rebasados en altura por un numero considerable de condiciones de oleaje, estos cinco espolones no presentaron retención de sedimento en sus caras de aguas arriba entre 1.988 y 1.996.

Podemos entonces adelantar a nivel cualitativo, que la tendencia de evolución del sector ha sido en general tendiente a la estabilidad, y que los procesos erosivos que se presentaron después del paso del Joan entre el espolón Iribarren fueron contrarrestados por el relleno dispuesto en esa zona entre 1.990 y 1.991. Específicamente entre el Hotel Capilla del Mar y el Sector el Limbo, donde no tuvieron intervención factores antropicos en los años de análisis podemos constatar la tendencia a la estabilización natural que ha tenido la zona.

No deja de llamar la atención de que ni siquiera el primero de los espolones entre la Calle 11ª y el Limbo presente acresión en su cara de aguas arriba, lo cual implica que la deriva litoral en ese sector y por ende de allí en adelante ha sido interceptada o alejada de la costa por procesos antropicos o naturales, siendo más probables estos últimos, ya que entre el sector el Limbo y el Sector de Santo Domingo hay establecidas unas estructuras y desde la Península de Bocagrande hasta el sector de Crespo en el litoral de Cartagena encontramos una gran cantidad de intervenciones realizadas para la estabilización de esos tramos de playa. Relacionamos a continuación las características de las estructuras del sector (Ver Tabla No23):

Los datos de profundidades en el extremo de las estructuras están relacionados al estado de estas según la batimetría realizada en 1.996 por el Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental de la Universidad de Cartagena.

**TABLA No. 23 ESTRUCTURAS SOBRE LA LÍNEA DE COSTA DE
BOCAGRANDE**

| Estructura | Ubicación | Características |
|-------------------|---|--|
| Espolón Iribarren | Extremo sur de la Península de Bocagrande | Llega a la cota -2.75 mts, con 156 mts de longitud desde la orilla. (Construido entre 1.965 y 1.969) |
| Espolón E1 | Frente al Hotel Caribe | Llega a la cota -0.875 mts, con 84 metros desde la línea de costa. |
| Espolón E2 | Entre la Calle 4ª y la Calle 5ª | Llega a la cota -0.625 mts, con 40 metros desde la línea de costa. (Construido junto al E1 entre 1.990 y 1.991) |
| Espolón E3 | Frente a la Calle 6ª | Llega a la cota -0.73, con 60 metros desde la línea de costa |
| Espolón E4 | Frente a la Calle 7ª | Llega a la cota -0.84 con 44 metros desde la línea de costa |
| Rompeolas No 1 | Frente a la Calle 8ª | Con la T sobre la cota -1.0 mt. (Construido junto al E3 y E4 en 1.983) |
| Rompeolas No2 | Entre la Calle 8ª y la 9ª | Con la T sobre la cota -.075 mt |
| Rompeolas No3 | Entre la Calle 9ª y la 10ª | Con la T sobre la cota -0.53 mts |
| Rompeolas No 4 | Sobre la Calle 10ª | Con la T sobre la cota -0.5 mts |
| Rompeolas No 5 | Sobre la Calle 11ª | Con la T sobre la cota -0.50 mts maximo |

"ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS DE EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y PROTECCIÓN DE LAS PLAYAS DE BOCAGRANDE. TRAMO ESPOLOÓN IRIBARREN-SECTOR EL LIMBO"

| Estructura | Ubicación | Características |
|--|--|---|
| Muro | Entre la Calle 11° y el Sector el Limbo | Muro con borde sobre el agua, con material en piedra, altura variable, forma irregular. |
| Espolón E5 | Entre la Calle 11° y la 12° | Llega a la cota -0.70 metros, con 50 metros desde la línea de costa |
| Espolón E6 | Entre la Calle 12° y la 13° | Con 34 metros a partir de la línea de costa. |
| Espolón E7 | Entre la Calle 13° y 14° | Llega a la cota -0.80 metros, con 32 metros desde la línea de costa |
| Espolón E8 | Entre la Calle 14° y 15° | Llega a la cota -1.0 mts con 30 metros desde la línea de costa |
| Espolón E9 | Al final del sector el Limbo | Con 30 metros desde la línea de costa |
| 4 espolones adicionales aguas arriba de los anteriores | Entre el sector el Limbo y el baluarte de san Francisco Javier | Espolones entre 40 y 50 metros, llegando aproximadamente a la cota -1.0 mts. |

8.2.4 Refracción del oleaje.

Se analizó el proceso de refracción y rotura del oleaje en el sector. Este análisis tuvo por herramienta la Subrutina RCPWAVE, modelo de análisis de refracción del S.M.S, también llamado Modelo Externo de Transformación de Oleaje.

La idea fue evaluar la evolución de los frentes de oleaje desde aguas profundas hasta su rotura, haciendo énfasis en la determinación de la variación en altura de ola y la variación del ángulo de aproximación del oleaje a la costa.

Para el análisis comprendido entre las cotas -100.0 mts y -10.0 mts se utilizó la Carta Náutica COL 409 escala 1: 100.000 levantamiento de 1.992, y para el análisis entre la cota -10.00 y -5.00 mts la Carta Náutica COL 261 levantamiento de 1.988 y escala 1: 25.000. Ambas Cartas son de autoría del Servicio Hidrográfico del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (C.I.O.H) de la Armada Nacional al cual agradecemos. El análisis entre la cota -5.00 metros y la orilla se hizo sobre la batimetría realizada en 1.996 por el Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena, escala 1: 2.000.

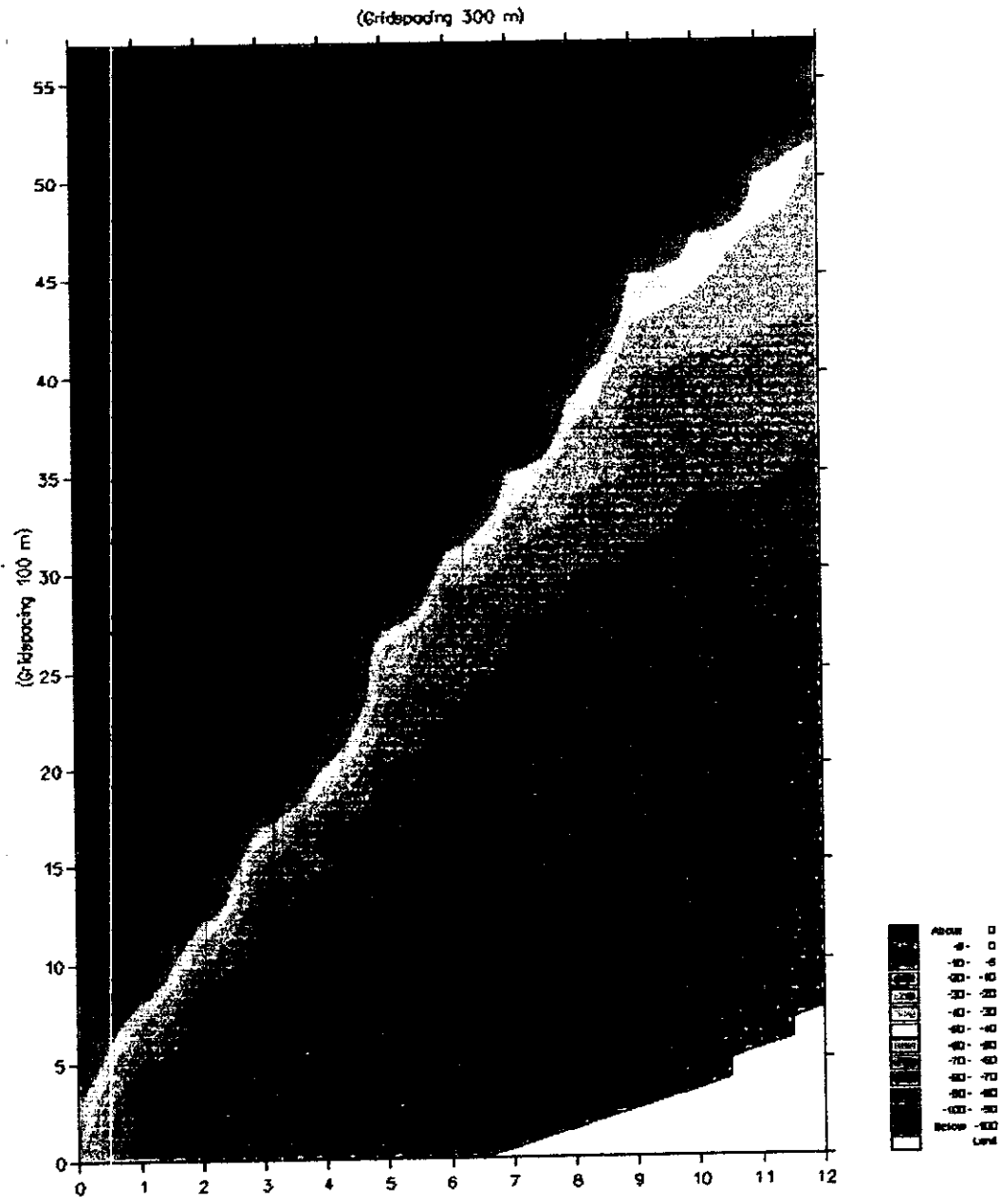
8.2.4.1 Metodología de análisis de refracción entre la cota -100.00 y -10.00 mts.

Sobre la Plancha Col 409 se trazaron dos mallas:

La primera (ver Figura No 26 Malla No.1) con origen en el punto $10^{\circ} 25' 8''$ de latitud y $75^{\circ} 35' 30''$ de longitud (Datum W.G.S 84), para evaluar el oleaje NE. Esta malla tenía su eje de las Y rotado 15° en contra de las manecillas del reloj con respecto al Norte. Se extiende a lo largo de 13 celdas de 1200 mts en el sentido horizontal y cuenta con 58 celdas de 400 mts en el sentido vertical. Los datos relativos a la cota -10.00 para Bocagrande se evaluaron en las celdas (5,2) y (6,3), que de acuerdo a la superposición de las planchas eran las celdas que permitían empalmar la Carta COL 409 con la COL 261, justo enfrente de Bocagrande.

La segunda malla (Ver Figura No 27 Malla No.2) tiene origen en el punto $10^{\circ} 25'$ de Latitud y $75^{\circ} 35'$ de longitud (Datum WGS 84), se trazó para evaluar los oleajes N, NW y W. Su eje de las Y esta rotado 25° en contra de las manecillas del reloj con respecto al Norte. Esta malla se extiende 10 celdas de 1.200 mts cada una en el sentido horizontal y tiene 52 celdas de 400 mts en el sentido vertical. Los datos relativos a la cota -10.00 metros se evaluaron en las celdas (1,1) y (1,2) que de acuerdo a la superposición de las planchas eran las celdas que permitían empalmar la Carta COL 409 con la COL 261, justo enfrente de Bocagrande para esta malla.

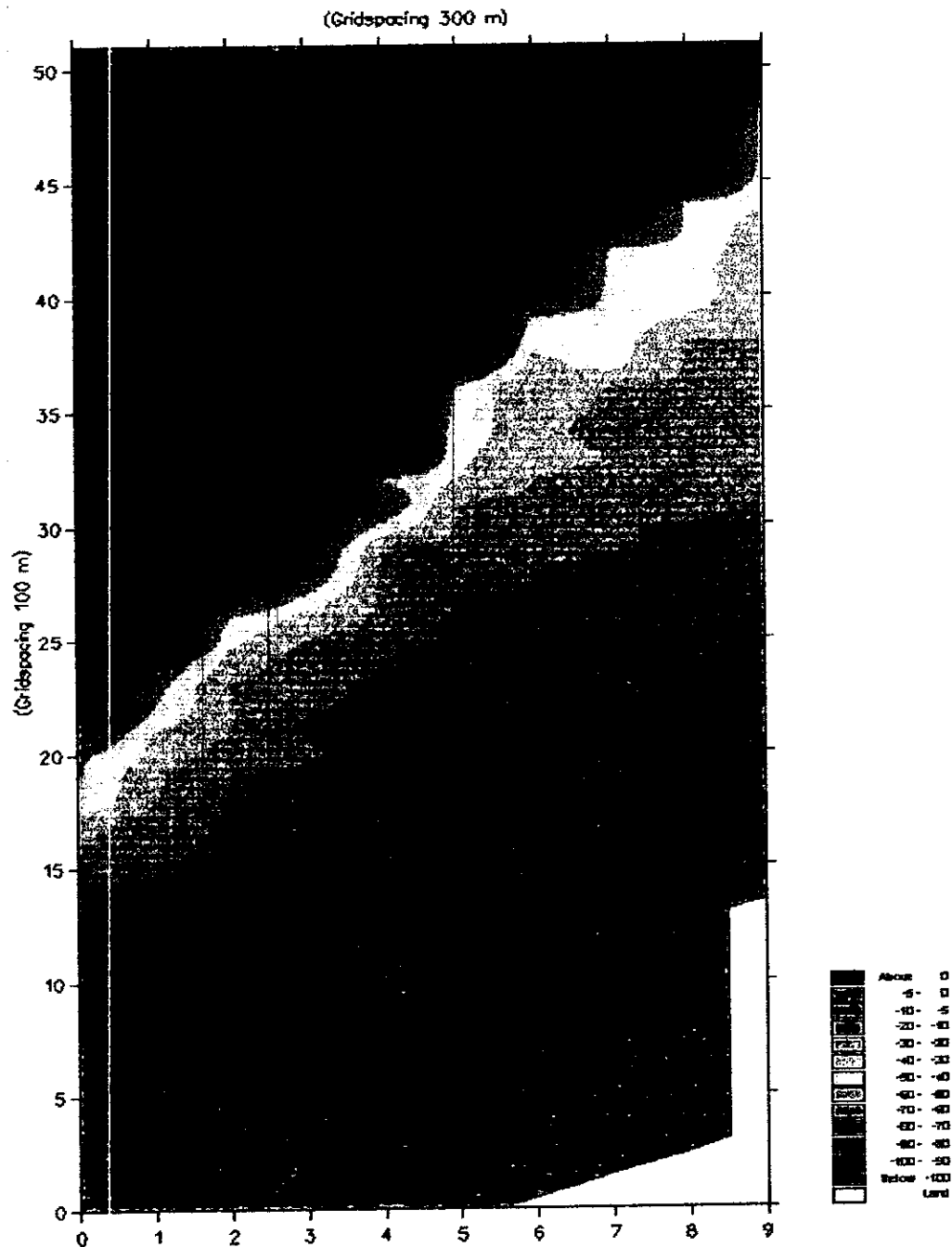
**FIGURA No.26. MALLA DE ANALISIS DE REFRACCION DE OLEAJE.
COTA -100.0 MTS A COTA -10.0 MTS.
ORIENTACION -15° RESPECTO AL NORTE.**



Fuente: Datos extraidos de Carta Nautica COL409. Centro de Investigaciones Oceanograficas e Hidrograficas. C.I.O.H. 1.992.



**FIGURA No.27. MALLA DE ANALISIS DE REFRACCION DE OLEAJE.
COTA -100.0 MTS A COTA -10.0 MTS.
ORIENTACION -25° RESPECTO AL NORTE.**



Fuente: Datos extraidos de Carta Nautica COL409. Centro de Investigaciones Oceanograficas e Hidrograficas. C.I.O.H. 1.992.

La razón que nos obligó a utilizar 2 mallas para evaluar diferentes oleajes obedece a una limitación de la formula que utiliza el RCPWAVE para evaluar refracción: el ángulo máximo que permite se introduzca es del orden de los 71.5° en ambos sentidos, lo cual nos da un espectro angular de máximo 143° , siendo los valores extremos (71.5° y -71.5°) y cercanos a los extremos fuente de distorsión. Colocando la primera malla con un eje vertical rotado 15° respecto al Norte la dirección NE de acuerdo a la malla del RCPWAVE quedaba con un ángulo de -60.00° . En cuanto a la segunda malla, estando rotado su eje vertical 25° con respecto al Norte los valores angulares para la malla de RCPWAVE quedaban así: -70° el NE, -25° el N, 20° el NW y 65° el W. Teniendo en cuenta lo anterior se evaluó el oleaje NE en la Malla No.1 y los restantes en la Malla No. 2.

Para evitar confusiones en el análisis de los resultados hemos escogido como sistema de referencia angular el tradicional, es decir con 0° en el Norte y ángulos positivos a partir del Norte en el sentido horario y ángulos negativos a partir del Norte en contra de las manecillas del reloj. De acuerdo a esto las direcciones de los oleajes en aguas profundas son: NE (45°), N(0°), NW(-45°) y W(-90°).

Los datos de oleaje que se utilizaron como datos de entrada corresponden al clima de oleaje en aguas profundas del Caribe Sector 47 del Global Waves Statistics, ver Tablas No 12 a 21. Los resultados del análisis se pueden apreciar en la TABLA No. 24

135.

| OLEAJE | T | COTA -100 | | COTA -10 | | COTA -5,0 | | PROF ROTURA | ALTURA ROTURA | A GENESIS | | A GENESIS | | % OCURRENCIA ANUAL |
|--|---|-----------|------|----------|-------|-----------|--------|-------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|--------------------|
| | | H100 | A100 | H10 | A10 | H5 | A5 | | | CAPILLA-LIMBO | COTA -5.0 MTS | IRIBARREN-LIMBO | COTA -5.0 MTS | |
| ORESTE | 4 | 0,2 | 45 | 0,1 | 31 | 0,1 | 12,2 | ORILLA | 0,1 | | -32,2 | -47,12 | | 0,47 |
| ORESTE | 5 | 0,5 | 45 | 0,3 | 19 | 0,2 | 0 | ORILLA | 0,3-0,2 | | -20 | -34,75 | | 3,4 |
| ORESTE | 6 | 1,3 | 45 | 0,7 | 9,5 | 0,6 | -8,5 | 0,4-0,9 | 0,74(S)-0,32 | | -11,5 | -26,5 | | 8,08 |
| ORESTE | 7 | 3 | 45 | 1,65 | 1,5 | 1,65 | -14,13 | 0,8-2 | 1,33(S)-0,56 | | -58,7 | -20,87 | | 8,36 |
| ORESTE | 8 | 6,2 | 45 | 3,45 | -7 | 3,6 | -14,87 | 3,0-4,00 | 1,2-1,8 | | -5,13 | -14,87 | | 4,82 |
| ORESTE | 9 | 11,8 | 45 | 5,9 | -14,5 | 2,13 | -25,13 | 11,1 | 6,2 | | 5,13 | -9,87 | | 1,85 |
| NORTE | 4 | 0,2 | 0 | 0,2 | -2 | 0,17 | -9,34 | ORILLA | 0,3-0,2 | | -10,66 | -25,66 | | 1,29 |
| NORTE | 5 | 0,8 | 0 | 0,7 | -7 | 0,65 | -16,57 | 0,6-0,9 | 0,8(S)-0,2-0,4 | | -3,43 | -18,43 | | 1,54 |
| NORTE | 6 | 2,2 | 0 | 1,8 | -13 | 1,82 | -22,47 | 0,8-2,2 | 0,9(S)-0,3-1,0 | | 2,47 | -12,53 | | 0,66 |
| NORTE | 7 | 5,5 | 0 | 4,4 | -18 | 2 | -26,81 | 4,6-6 | 1,8-2,9 | | 6,81 | -8,19 | | 0,21 |
| NORTE | 8 | 12 | 0 | 4 | -23 | 2,42 | -31,72 | 8,1-12,5 | 3,2-4,9 | | 11,72 | -3,27 | | 0,053 |
| ROESTE | 4 | 0,3 | -45 | 0,3 | -46 | 0,28 | -46,83 | 0,4-ORILLA | 0,3-0,5 | | 26,83 | 11,83 | | 0,71 |
| ROESTE | 5 | 1,3 | -45 | 1,2 | -47 | 1,18 | -47,82 | 1,7-1,1 | 0,5(S)-0,5-0,7 | | 27,82 | 12,82 | | 0,39 |
| ROESTE | 6 | 4,1 | -45 | 3,7 | -48 | 2,83 | -48,65 | 4,6-5,1 | 1,8-2 | | 28,65 | 13,65 | | 0,11 |
| ROESTE | 7 | 11,1 | -45 | 4,1 | -50 | 1,99 | -39,92 | 10-14,4 | 4-5,5 | | 19,92 | 4,92 | | 0,032 |
| OESTE | 4 | 0,4 | -90 | 0,4 | -90 | 0,35 | -84,9 | 0,4-ORILLA | 0,4-0,1 | | 64,9 | 48,95 | | 0,585 |
| OESTE | 5 | 1,3 | -90 | 1,2 | -90 | 1,08 | -81,41 | 1,7-0,9 | 1,4-(0,3-0,7) | | 61,41 | 46,41 | | 0,32 |
| OESTE | 6 | 4,1 | -90 | 3,8 | -88 | 3,02 | -78,19 | 4,5-5 | 1,8-3,2 | | 58,19 | 43,19 | | 0,085 |
| OESTE | 7 | 11 | -90 | 6,5 | -87 | 2,33 | -76,51 | 10 | 6,5 | | 56,51 | 41,51 | | 0,17 |
| INSTITUTO DE HIDRAULICA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL | | | | | | | | | | | | | | |
| I.H.S.A | | | | | | | | | | | | | | |
| *ANALISIS DE LAS TENDENCIAS DE EVOLUCION DE LA LINEA DE COSTA Y PROTECCION DE LAS PLAYAS DE BOCAGRANDE TRAMO ESPOLON IRIARREN-SECTOR EL LIMBO* | | | | | | | | | | | | | | |
| UNIVERSIDAD DE CARTAGENA | | | | | | | | | | | | | | |
| MAURO MAZA CHAMORRO | | | | | | | | | | | | | | |
| ANALISIS DE OLEAJE CERCA A LA COSTA | | | | | | | | | | | | | | |
| TESIS DE GRADO | | | | | | | | | | | | | | |
| TABLA No 24 | | | | | | | | | | | | | | |

8.2.4.2 Metodología de análisis de refracción entre la cotas -10.00 mts y -5.00 mts.

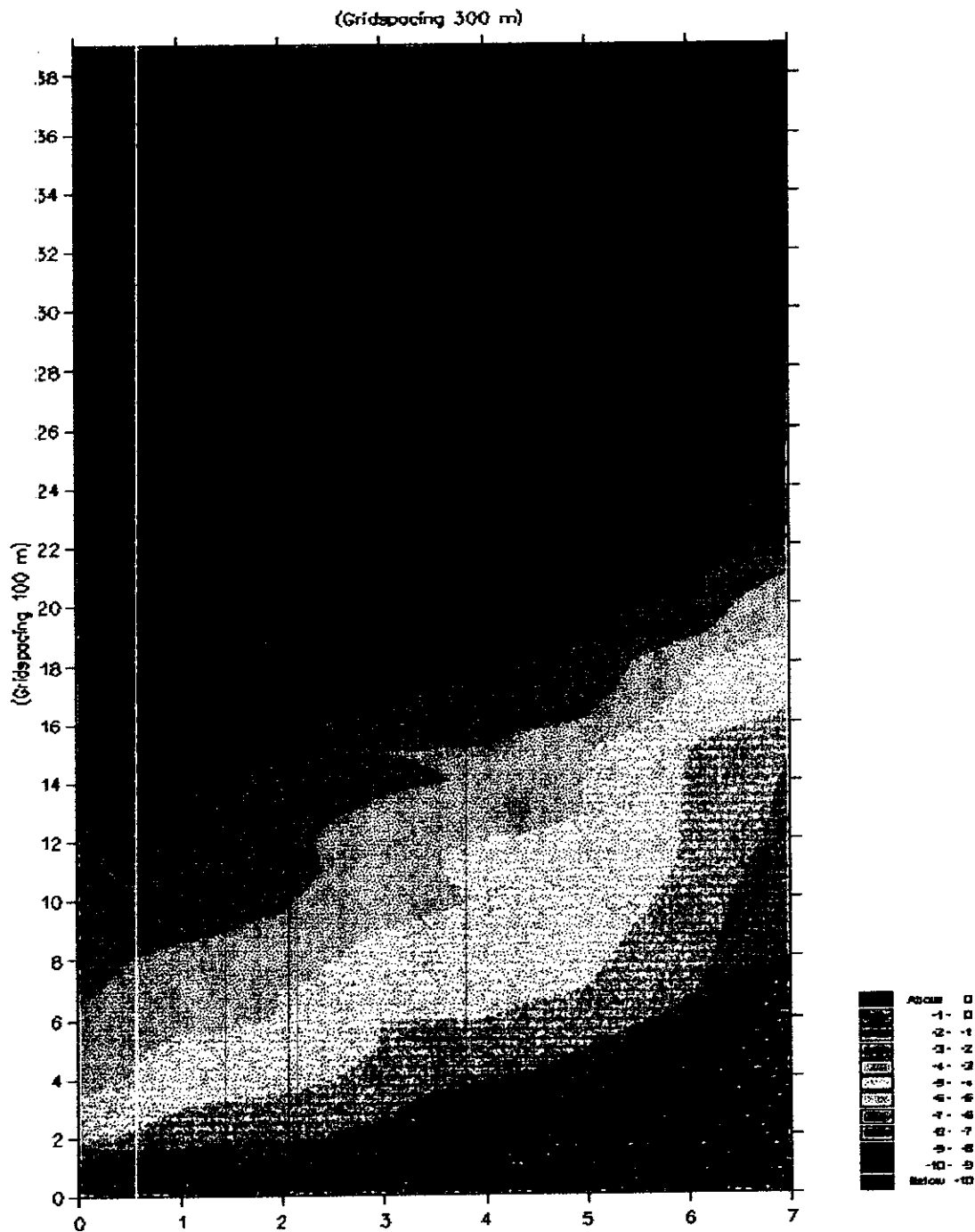
Sobre la Plancha Col 261 se trazó una malla de las siguientes características (Ver Figura No 28):

Origen en el punto $10^{\circ} 23' 57''$ de latitud y $75^{\circ} 34' 2''$ de longitud (Datum W.G.S 84). Esta malla tenía su eje de las Y rotado 35° en contra de las manecillas del reloj con respecto al Norte. Se extiende a lo largo de 8 celdas de 300 mts en el sentido horizontal y cuenta con 37 celdas de 1000 mts en el sentido vertical.

Los datos de oleaje que sirvieron de entrada se obtuvieron del análisis de oleaje entre la cota -100.0 y -10.00 mts. (Ver TABLA No 24).

Los datos relativos a la cota -5.00 metros para Bocagrande se evaluaron en las celdas (1,3), (2,4), (3,6), (4,8), (5,11), (6,14), (7,16) y (8,16) y se presenta el promedio de ellos en la TABLA No 24.

**FIGURA No.28. MALLA DE ANALISIS DE REFRACCION DE OLEAJE.
COTA -10.0 MTS A COTA -5.0 MTS.**



Fuente: Datos extraidos de Carta Nautica COL261. Centro de Investigaciones Oceanograficas e Hidrograficas. C.I.O.H. 1.988.

8.2.4.3 Metodología de análisis de refracción entre la cota -5.0 mts y la orilla.

Sobre el plano batimétrico de Bocagrande realizado por el Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental de la Universidad de Cartagena en 1.996 se trazó una malla de las siguientes características (Ver Figura No 29):

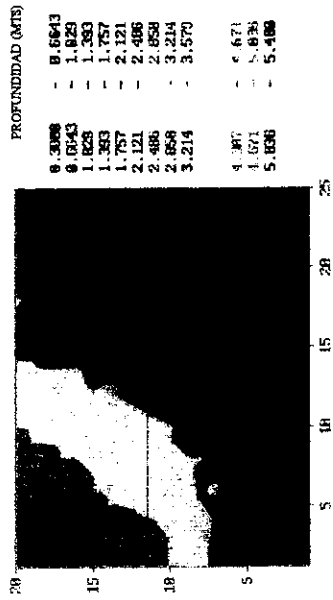
Origen en el punto 1.642.152 Norte y 837.230 Este coordenadas Gauss, con eje de las Y rotado 35° en contra de las manecillas del reloj con respecto al Norte. Se extiende a lo largo de 25 divisiones de 75 mts en el sentido horizontal y 20 divisiones de 25 mts en el sentido vertical, cubriendo el sector entre la Calle 11 y el espolón Iribarren.

Para cubrir el tramo entre la Calle 11 y el Sector el Limbo, anexa a la primera malla se trazó una segunda de igual orientación, con 22 divisiones de 25 metros en sentido vertical y 6 divisiones de 75 metros en sentido horizontal.

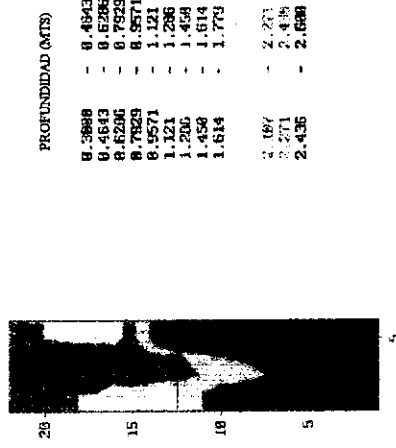
Los datos de oleaje que sirvieron de entrada se obtuvieron del análisis de oleaje entre la cota -10 y la -5.0 mts. (Ver TABLA No 24).

139.

**FIGURA No.29. MALLA DE ANALISIS DE REFRACCION DE OLEAJE.
COTA -10.0 MTS A COTA -5.0 MTS**



PRIMERA MALLA



SEGUNDA MALLA

8.2.4.4 Análisis de resultados de Modelación con RCPWAVE.

8.2.4.4.1 Oleaje NE

En cuanto al oleaje NE, el más importante de nuestro análisis, ya que para la zona de influencia es el que tiene mayor porcentaje de ocurrencia, podemos decir que sufre una gran transformación entre aguas profundas y aguas someras.

-Entre la cota -100.00 metros y la cota -10.00 metros ocurren las siguientes variaciones:

El oleaje de periodo 4 segundos sufre escasa variación desviándose un poco al NNE.

Los oleajes de periodos 5, 6 y 7 segundos sufren una variación apreciable rotándose del NE a la franja entre el N y el NNE con una disminución de altura entre el 30 y 50%.

Los oleajes de periodos 8 y 9 segundos rotan del NE hacia el sector entre el N y el NNW con una reducción aproximada del 50% en altura de ola.

Ocurre la rotura del oleaje de periodo 9 segundos en la cota -11.0 mts, pasando de una altura inicial de 11.8 mt a 6.2 mts.

-Entre la cota -10.00 mts y la cota -5.00 mts se presentan las siguientes variaciones:

El oleaje de periodo 4 segundos pasa la sector entre el NNE y el N.

Los oleajes de periodos 5 y 6 segundos pasan al sector entre el N y el NNW con escasa variaciones de altura entre la cota -10.00 y la -5.00 mts.

El oleaje de periodo 7 segundos continua con la tendencia observada entre la -100.0 y la -10.00.

El oleaje de periodo 9 segundos pierde casi el 80% de su altura en la cota -100.00.

-Entre la cota -5.0 mts y la orilla podemos señalar las siguientes variaciones:

Ocurre la rotura del oleaje de periodo 8 segundos entre las cotas -3.00 y -4.00 mts, la del de 7 segundos en la cota -2.00 mts, la del de 6 segundos en la de 0.90 mts y las de los de 4 y 5 segundos en la orilla con las características indicadas en la TABLA No 24.

8.2.4.4.2 Oleaje N.

-Entre la cota -100.00 metros y la cota -10.00 metros ocurren las siguientes variaciones:

Los oleajes de periodos 4 y 5 segundos sufren una muy leve variación hacia el NNW y no experimentan mayor disminución en la altura.

Los oleajes de periodos 6 y 7 segundos sufren una variación un poco más fuerte hacia el NNW, y experimentan una disminución del orden del 20%.

El oleaje de periodo 8 segundos sufre una fuerte desviación hacia el NNW y una reducción en su altura de ola del orden del 50%.

La rotura del oleaje de periodo 8 segundos ocurre entre las cotas -8.1 y -12.5, reduciéndose en un orden de magnitud del 50%.

-Entre la cota -10.00 y la cota -5.00 ocurren las siguientes variaciones:

Los oleajes de periodos 4, 5 y 6 segundos sufren desviación más pronunciada hacia el NNW y reducen su altura de ola como muestra la Tabla No 24.

Los oleajes de 7 y 8 segundos se desvían hacia la franja entre el NNW y el NW y continúan su reducción de altura de ola como lo muestra la TABLA No. 24.

-Entre la cota -5.0 mts y la orilla se presentan las siguientes variaciones: la rotura del oleaje de 7 segundos ocurre entre la cota -4.6 mts y la -6.0 mts, la del oleaje de periodo 6 segundos en la cota -2.00 mts, la del oleaje de periodo 5 segundos en la cota -0.90 mts y la del oleaje de periodo 4 segundos en la orilla.

8.2.4.4.3 Oleaje NW.

-Entre la cota -100.00 y la cota -5.00 mts el oleaje NW no sufre gran desviación de su dirección, esto debido a que la dirección de las curvas batimétricas es en general SW-NE en la zona de estudio (tendencia muy general en la costa colombiana), siendo estas aproximadamente paralelas a la dirección de dicho frente de olas oponiéndole un mínimo de resistencia.

Los valores en cuanto a variación de alturas y rotura se adjuntan en la Tabla No 24.

8.2.4.4.4 Oleaje W.

Por lo anteriormente expuesto, el oleaje W tampoco sufre mayores desviaciones en su dirección al aproximarse a la costa, este oleaje, muy común de octubre a noviembre al no sufrir gran efecto de refracción puede ser importante a pesar de no tener un gran porcentaje de ocurrencia anual.

Los datos acerca de su variación en altura de ola y rotura se pueden consultar en la Tabla No. 24.

8.2.4.5 Comparación de análisis de refracción con RCPWAVE con análisis precedentes.

En líneas generales nuestra aproximación a los fenómenos de oleaje concuerda mucho con el análisis hecho dentro del estudio "Playas de Cartagena. Estudio en Modelo reducido" echo por el Laboratorio de Hidráulica de Francia en 1.972. En dicho trabajo se precisa lo siguiente:

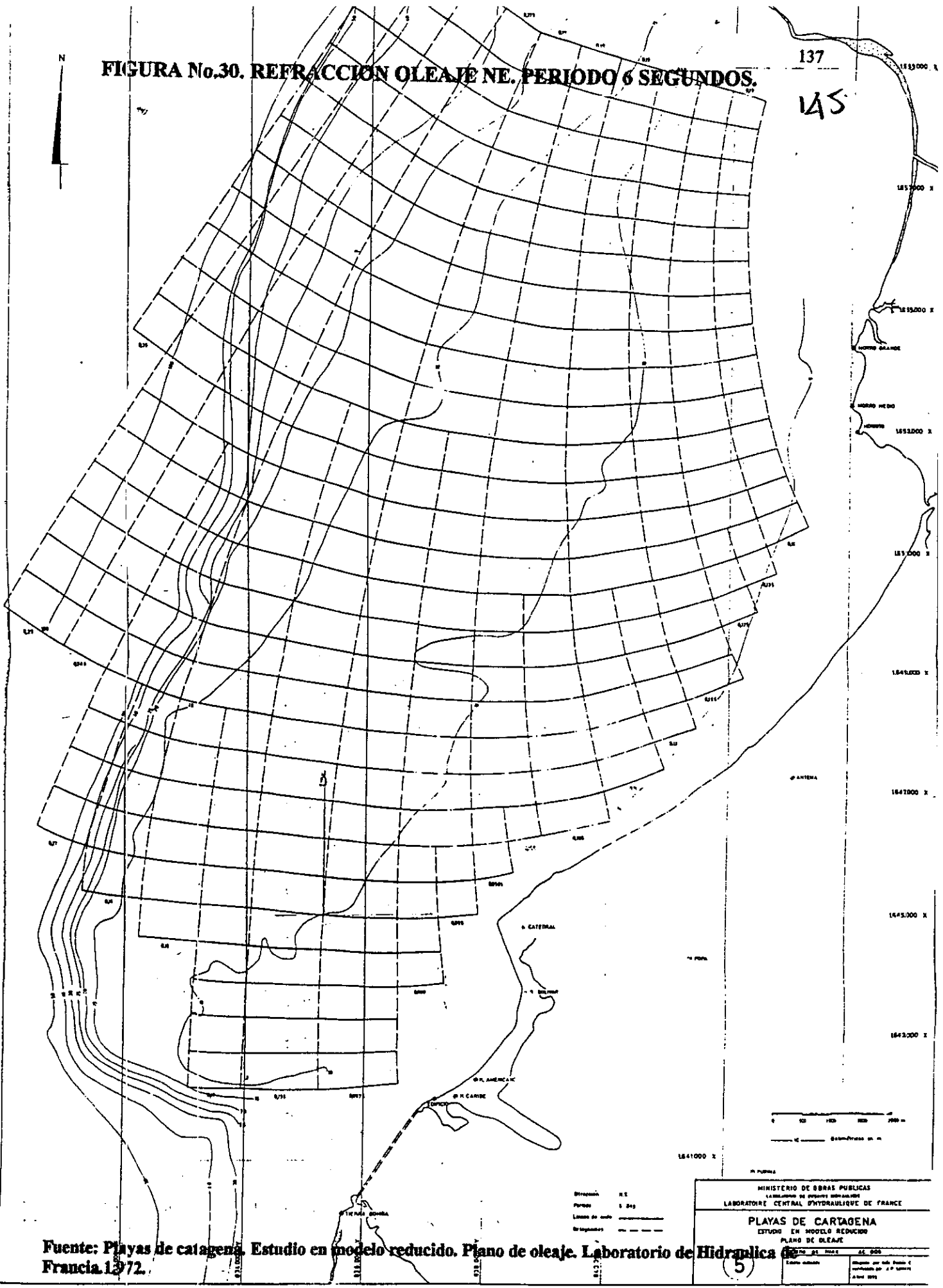
"A partir de Punta Canoas, la propagación del oleaje se hace de una forma muy parecida, siendo la dirección inicial del oleaje N, NNE o NE". Esto se puede apreciar en las Figuras 30 a 37 , y en nuestra Tabla No 24 salta a la vista tal característica en los oleajes N y NE, los cuales terminan teniendo dirección de propagación en la franja N-NW.

FIGURA No.30. REFRACCION OLAJE NE. PERIODO 6 SEGUNDOS.



137

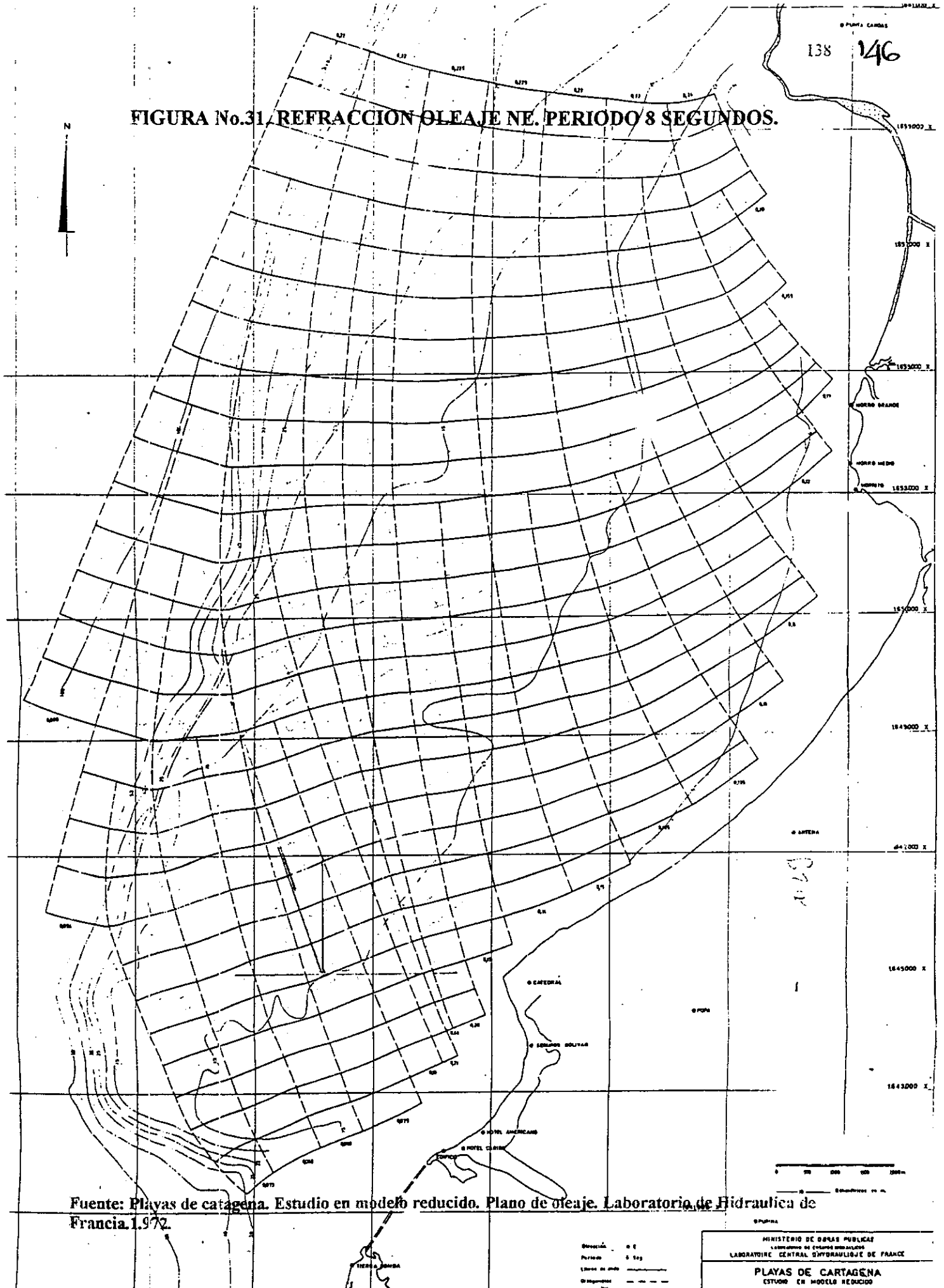
145



Fuente: Playas de cartagena. Estudio en modelo reducido. Plano de oleaje. Laboratorio de Hidraulica de Francia. 1972.

5

FIGURA No.31. REFRACCION OLEAJE NE. PERIODO 8 SEGUNDOS.

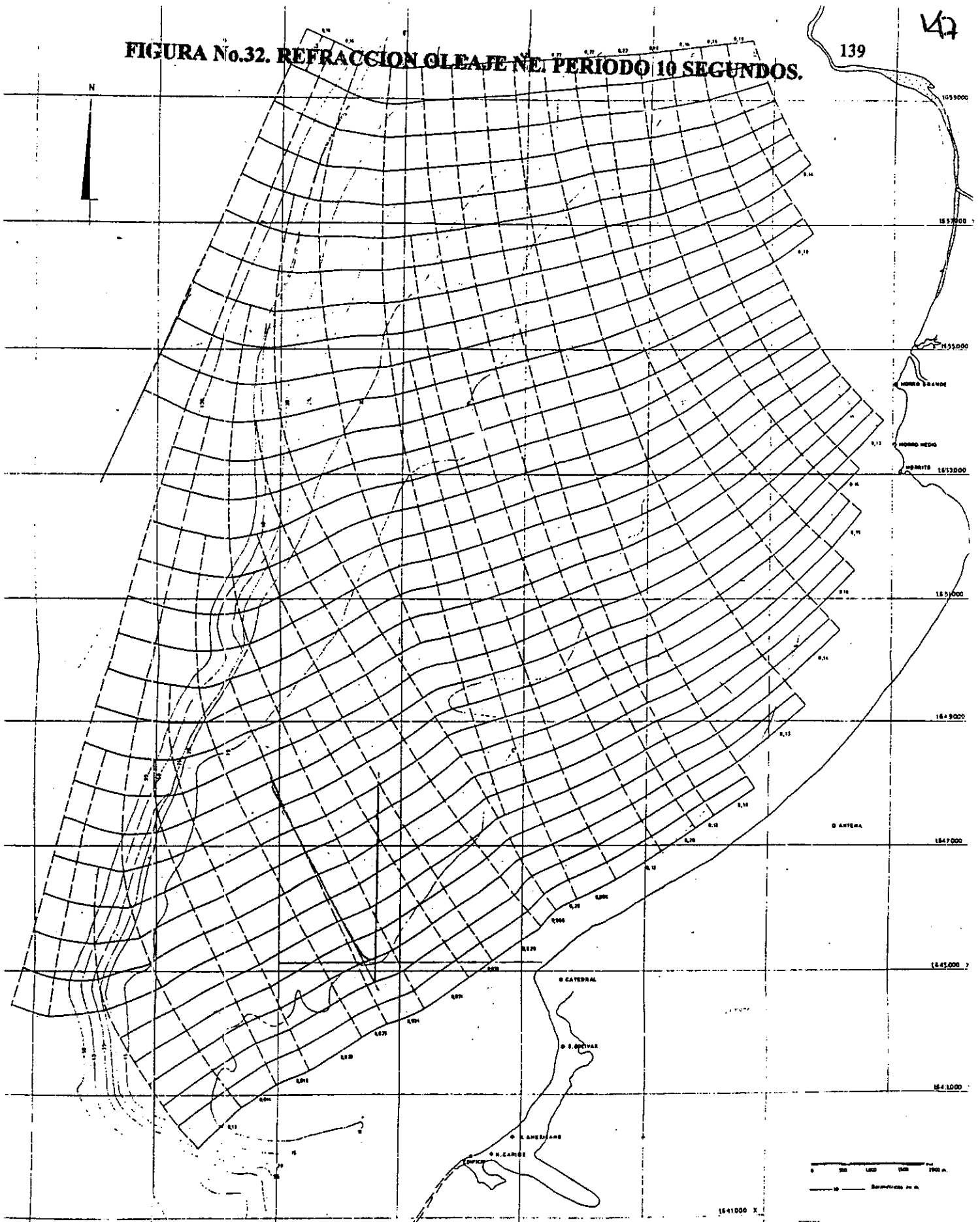


Fuente: Playas de cartagena. Estudio en modelo reducido. Plano de oleaje. Laboratorio de Hidraulica de Francia. 1.972.

Dirección: N-E
 Periodo: 8 seg.
 Línea de oleaje: ————
 Ortoplanimetría: - - - -

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
 LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE
PLAYAS DE CARTAGENA
 ESTUDIO EN MODELO REDUCIDO

FIGURA No.32. REFRACCION OLEAJE N.E. PERIODO 10 SEGUNDOS.

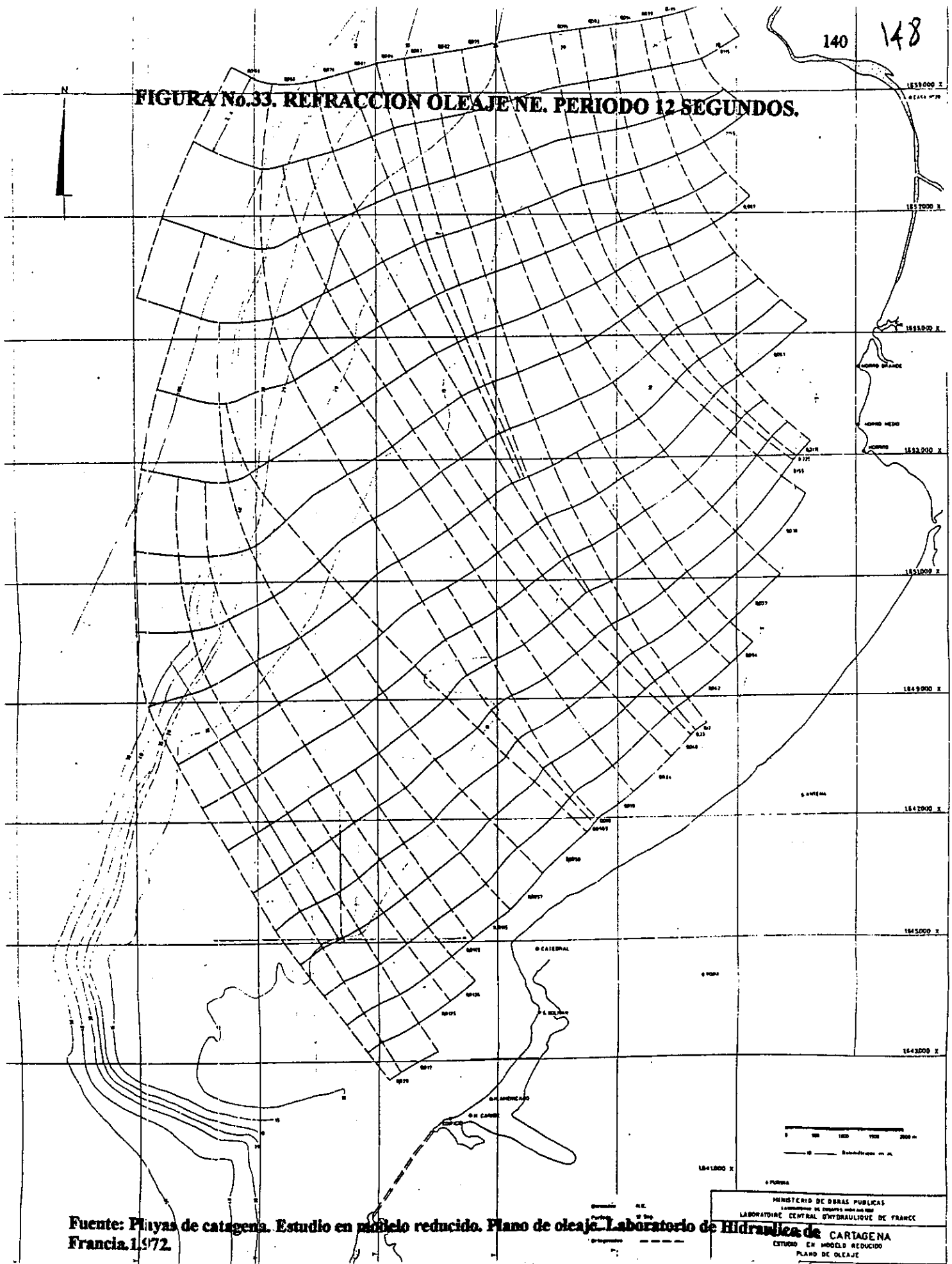


47

Fuente: Playas de cartagena. Estudio en modelo reducido. Plano de oleaje. Laboratorio de Hidraulica de Francia. 1.972.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
 LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE
 PLAYAS EN CARTAGENA
 ESTUDIO EN MODELO REDUCIDO

FIGURA N.º 33. REFRACCION OLAJE NE. PERIODO 12 SEGUNDOS.

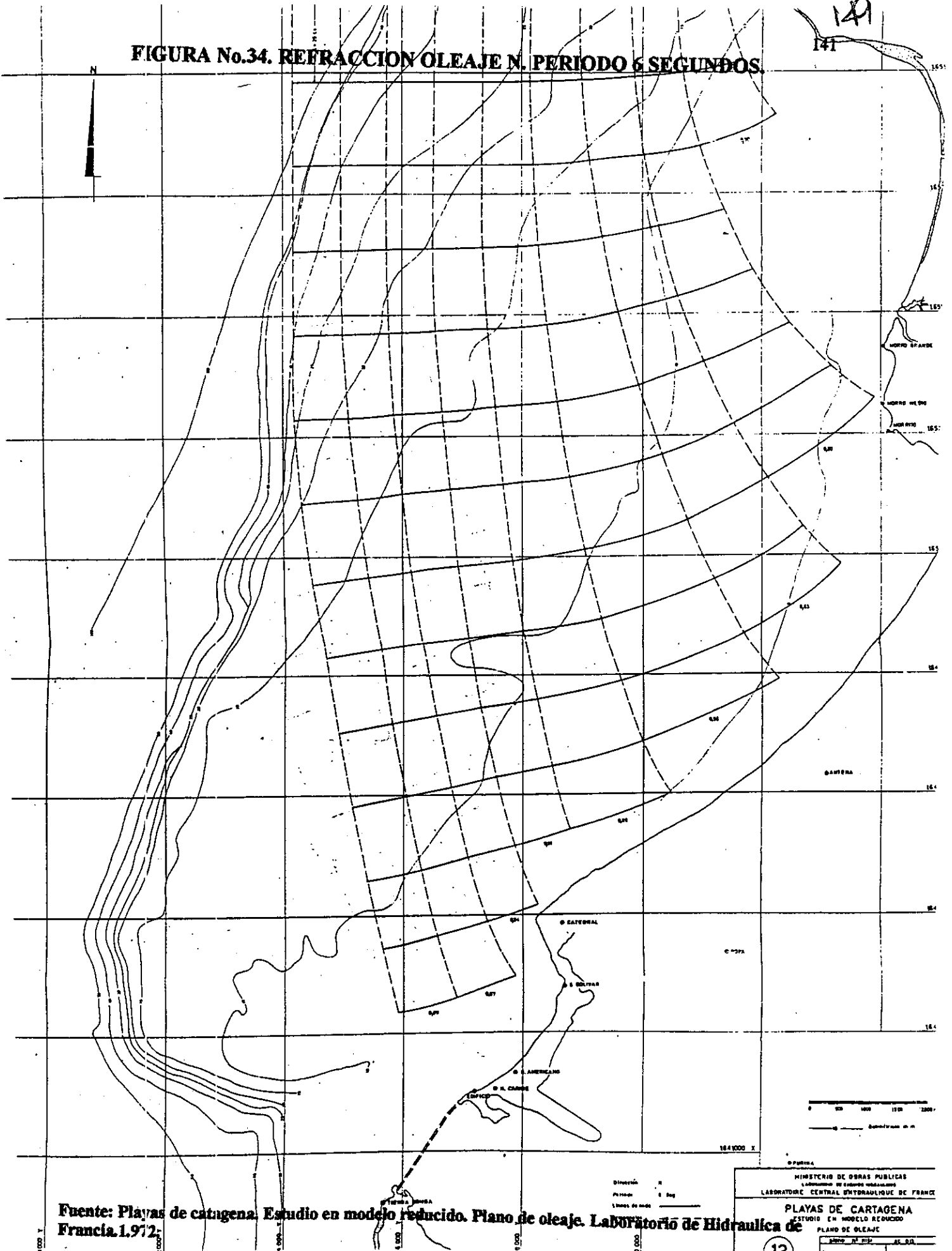


Fuente: Playas de cartagena. Estudio en modelo reducido. Plano de oleaje. Laboratorio de Hidraulica de Francia. 1972.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
 LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE
CARTAGENA
 ESTUDIO EN MODELO REDUCIDO
 PLANO DE OLAJE

FIGURA No.34. REFRACCION OLEAJE N. PERIODO 6 SEGUNDOS.

149
141

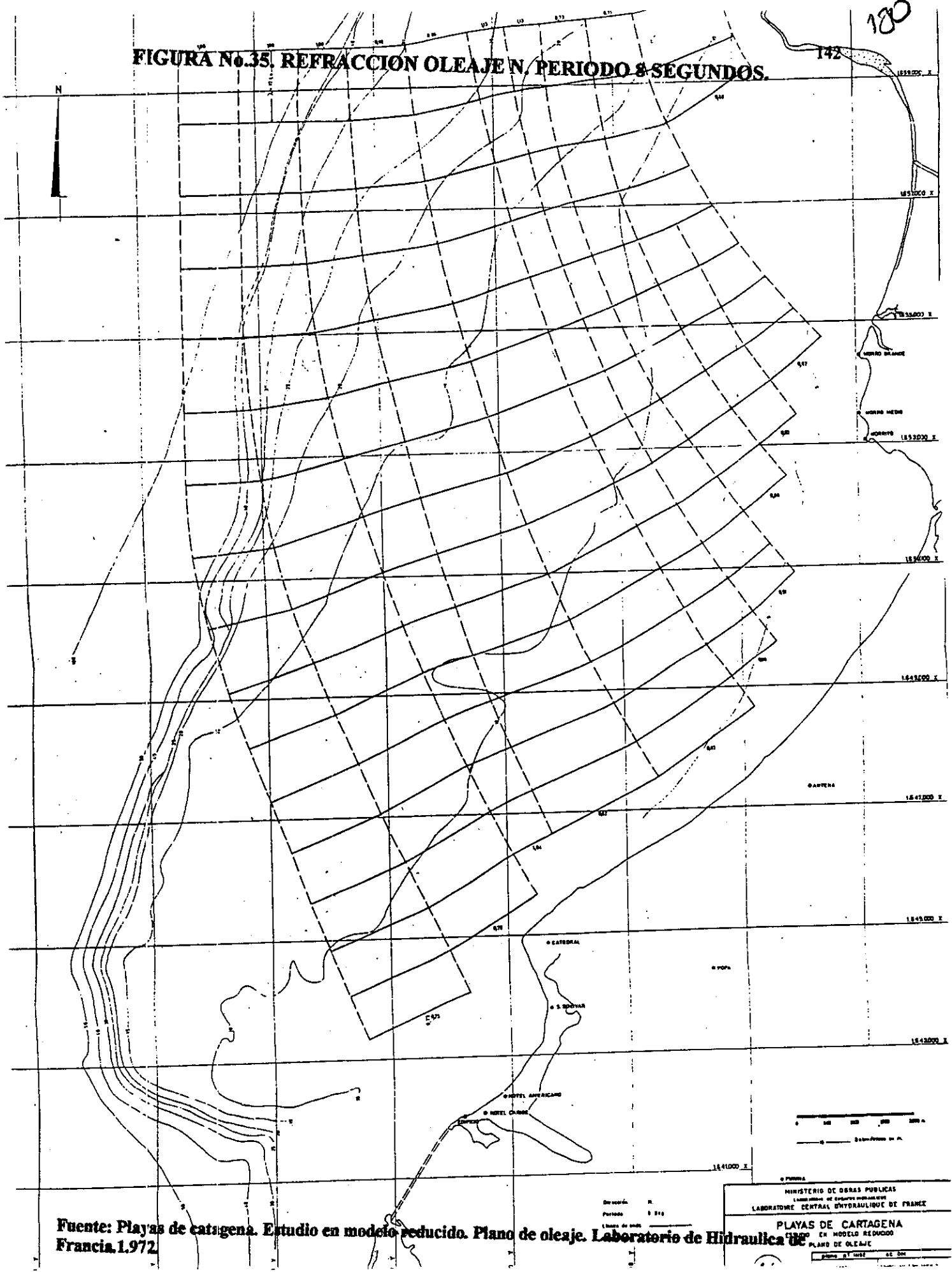


Fuente: Playas de cartagena. Estudio en modelo reducido. Plano de oleaje. Laboratorio de Hidraulica de Francia. 1.972.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
 LABORATOIRE CENTRAL HYDRAULIQUE DE FRANCE
PLAYAS DE CARTAGENA
 ESTUDIO EN MODELO REDUCIDO
 PLANO DE OLEAJE
 13

FIGURA N° 35. REFRACCION OLEAJE N PERIODO 8 SEGUNDOS.

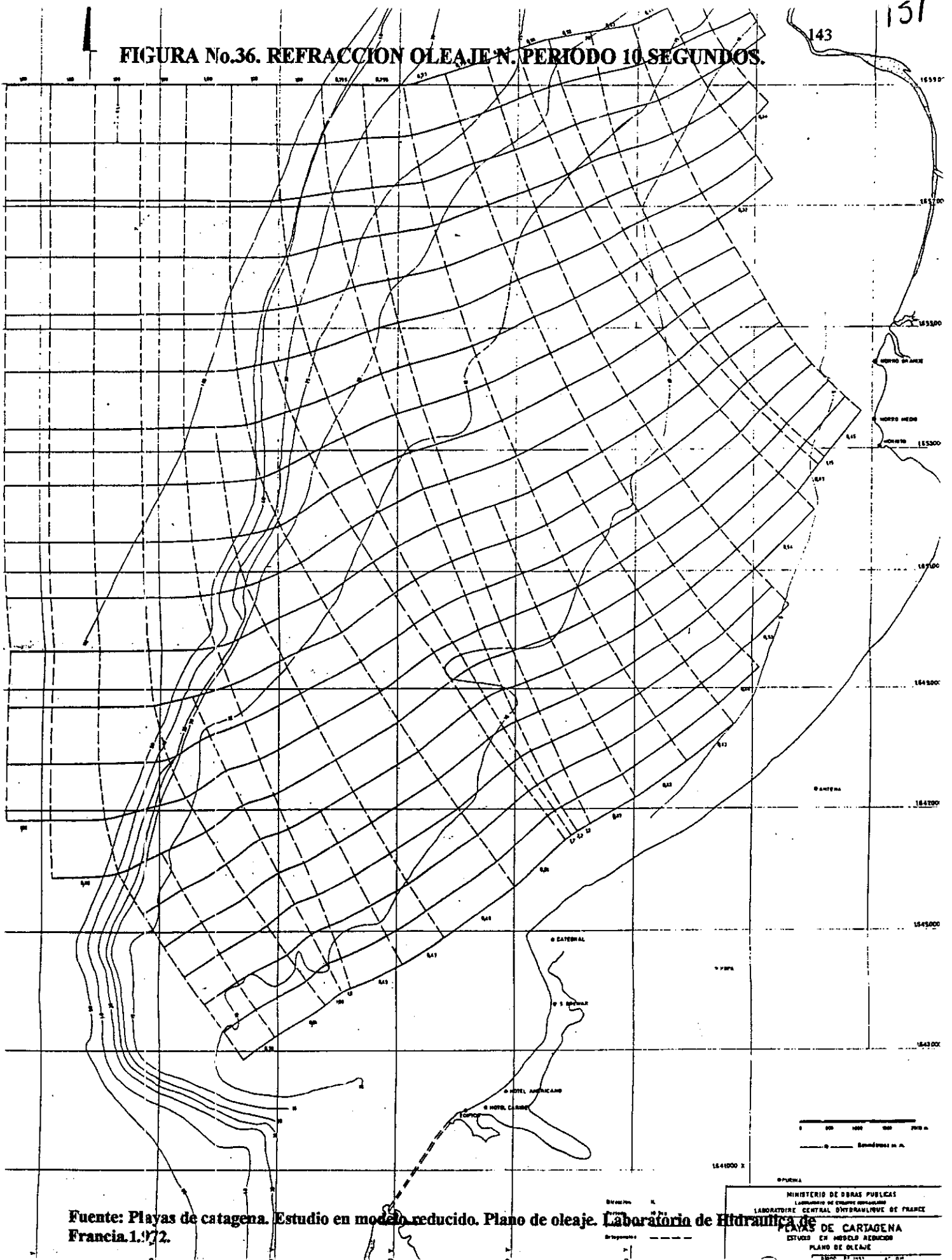
180



Fuente: Playas de cartagena. Estudio en modelo reducido. Plano de oleaje. Laboratorio de Hidraulica de Francia. 1.972

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
 LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE
PLAYAS DE CARTAGENA
 EN MODELO REDUCIDO
 PLANO DE OLEAJE
 ESCALA 1:1000

FIGURA No.36. REFRACCION OLEAJE N. PERIODO 10 SEGUNDOS.

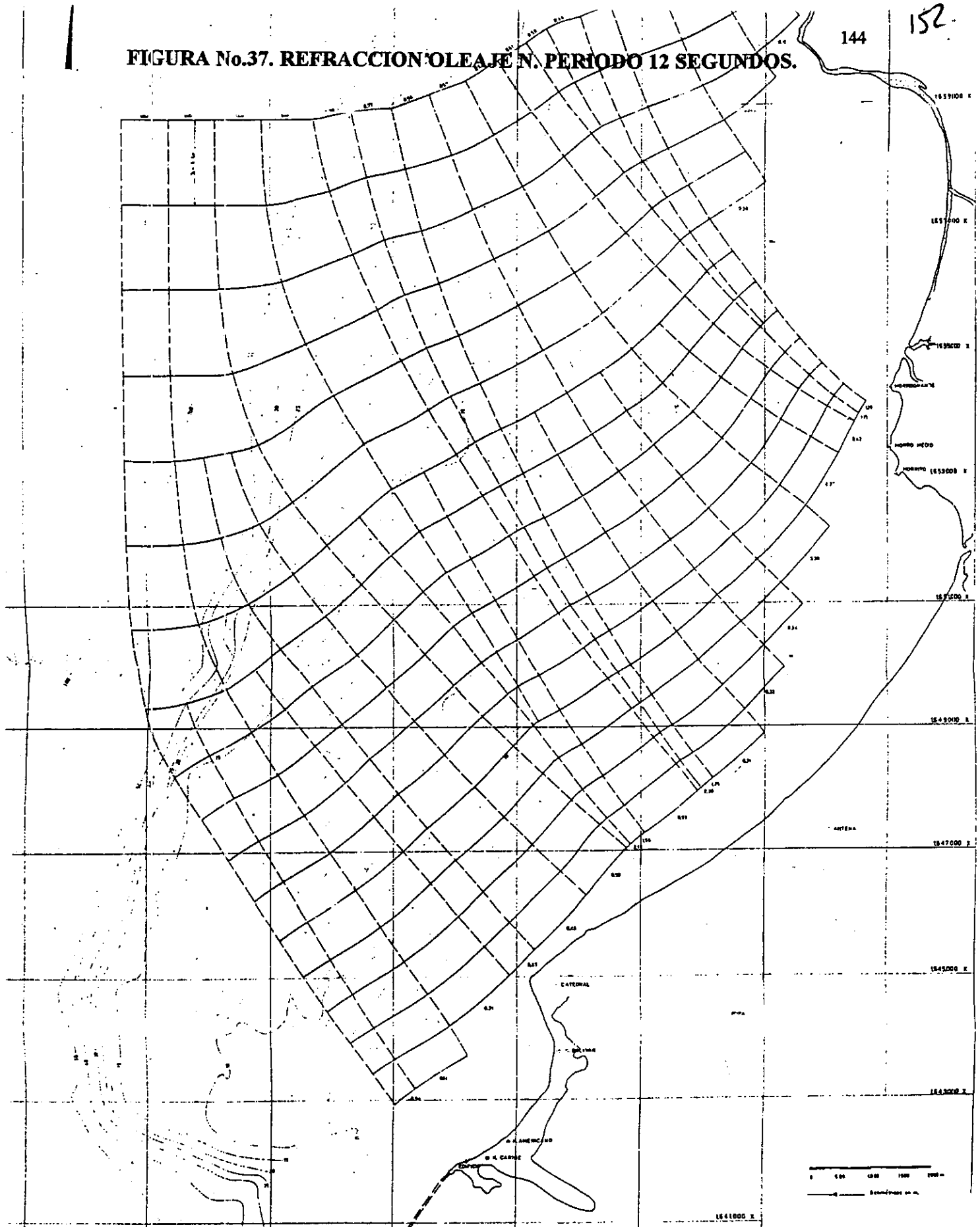


Fuente: Playas de catagena. Estudio en modelo reducido. Plano de oleaje. Laboratorio de Hidráulica, Francia. 1.972.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
 LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE
 ESTUDIOS EN MODELO REDUCIDO
 PLANOS DE OLEAJE

FIGURA No.37. REFRACCION OLEAJE N. PERIODO 12 SEGUNDOS.

144 152



Fuente: Playas de cartagena. Estudio en modelo reducido. Plano de oleaje. Laboratorio de Hidraulica de Obras Publicas
 Francia. 1972

Periodo: 12 Seg
 Escala de onda: ---
 Escala de profundidad: ---

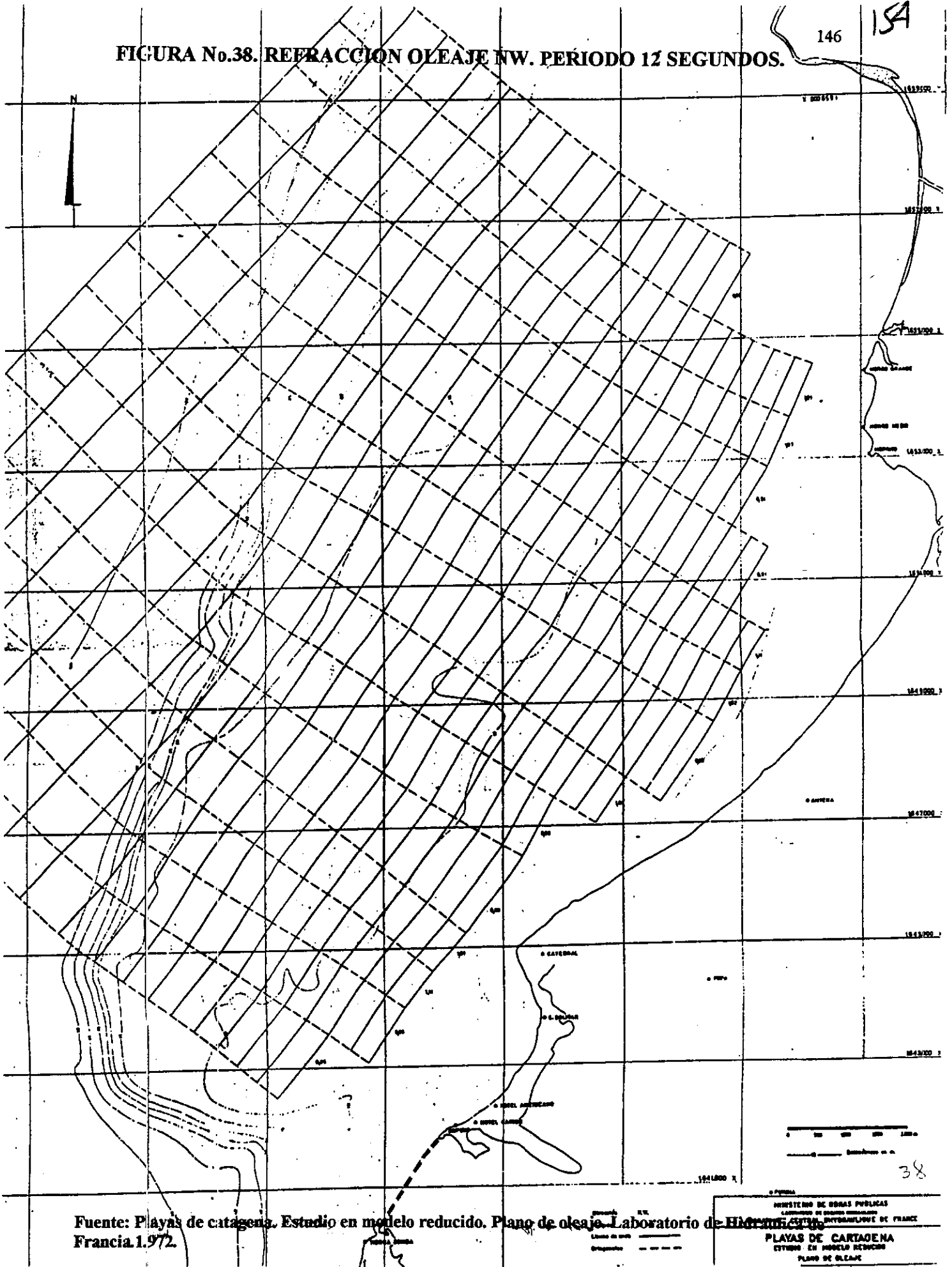
LABORATOIRE CENTRAL HYDRAULIQUE DE FRANCE
PLAYAS DE CARTAGENA
 ESTUDIO EN MODELO REDUCIDO
 PLANO DE OLAJE

“La plataforma submarina prácticamente no afecta la propagación del oleaje NW de periodo 12 segundos como se puede apreciar en la Figura No 38: La dirección de las líneas de onda y la energía entre cada ortogonal se conservan hasta la costa. También se puede afirmar que el resultado habría sido muy similar para la propagación del mismo oleaje NW, pero de periodos inferiores a 12 seg ”. Esto ultimo concuerda totalmente con nuestras conclusiones sobre el oleaje NW. “El plano de oleaje W T= 10 segundos muestra una concentración de energía frente a la zona del Limbo, concentración que se debe a la forma de la extremidad en la plataforma submarina. También para esta dirección, se podría esperar un resultado análogo para los periodos menores de 10 segundos, pero con un aumento de energía más reducido a la zona arriba mencionada (Ver Figura No 39) ”. Si se observa con atención la figura se puede concluir que la propagación evaluada por los miembros del equipo francés de 1.972 concuerdan con nuestros resultados (Ver Tabla No 24). La diferencia fundamental entre los dos análisis es el rango de periodos considerado, pero como dijimos en el capítulo de Oleaje tal diferencia proviene de que la correlación de periodos y alturas fue hecha de manera diferente.

FIGURA No.38. REFRACCION OLEAJE NW. PERIODO 12 SEGUNDOS.

146

15A



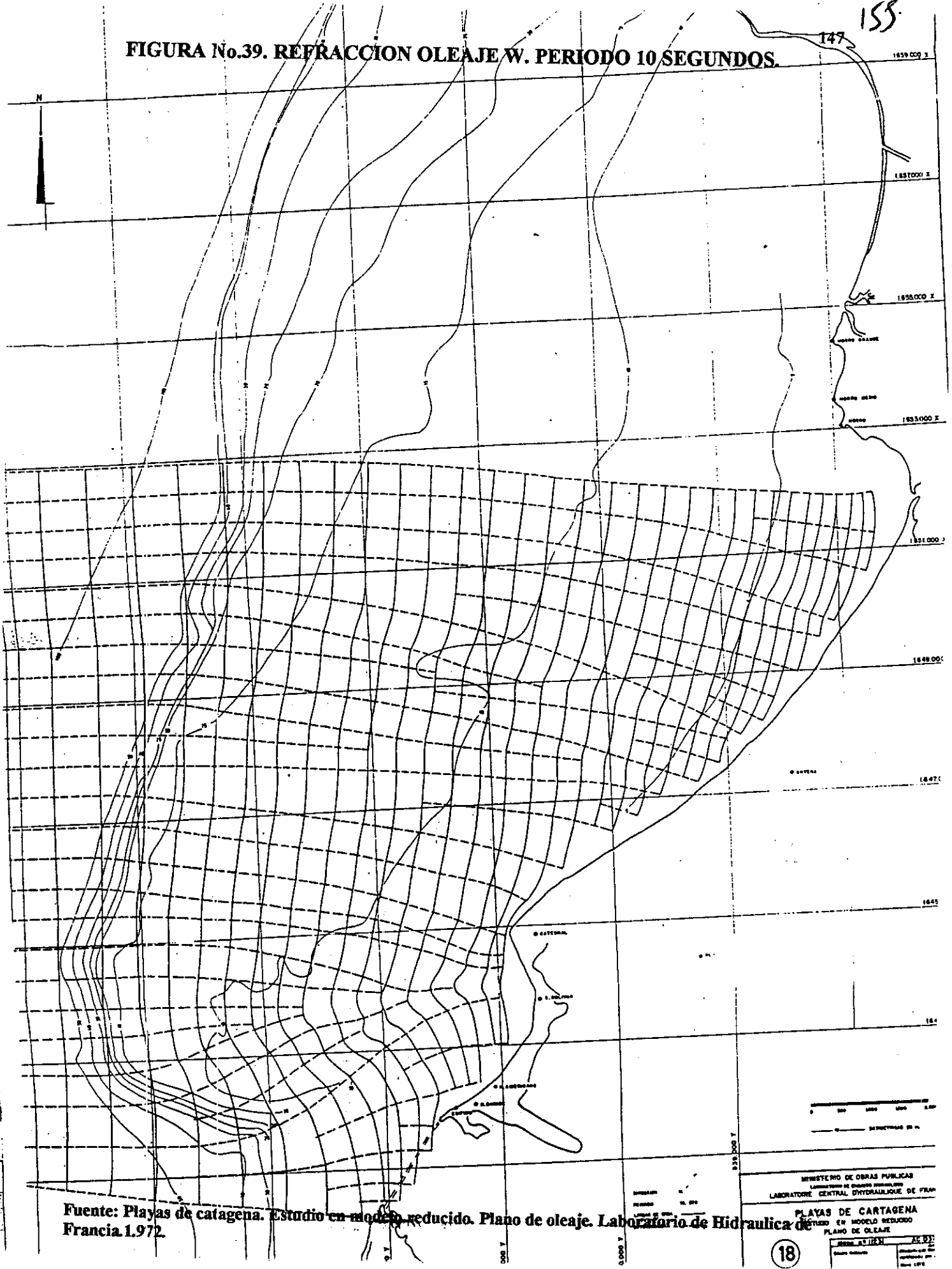
Fuente: Playas de cartagena. Estudio en modelo reducido. Plano de oleaje. Laboratorio de Hidráulica. Francia. 1.972.

38

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
 LABORATOIRE DE OUVRES PUBLICS
 CENTRE HYDRAULIQUE DE FRANCE
 PLAYAS DE CARTAGENA
 ETUDE EN MODELE REDUCIS
 PLANO DE OLEAJE

FIGURA No.39. REFRACCION OLEAJE W. PERIODO 10 SEGUNDOS.

158



Fuente: Playas de cartagena. Estudio en modelo reducido. Plano de oleaje. Laboratorio de Hidraulica de Francia. 1.972.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
 LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE
 PLAYAS DE CARTAGENA
 ESTUDIO EN MODELO REDUCIDO
 PLANO DE OLAJE

18

8.2.4.6 Análisis de franja de rotura.

Como se puede apreciar en la Tabla No 24, el 24,7% del oleaje anual rompe de la cota -2.0 mts hacia la orilla y un 16.45 % entre la cota -1.0 mts y la orilla. Considerando la muestra total de oleaje de nuestro análisis (Oleaje del sector NE hasta el W) esto implica que el 74.56% del oleaje rompe entre la cota -2.0 mts y la orilla y el 49.69% entre la cota -1.0 mts y la orilla. Estos datos son de gran relevancia a la hora de evaluar la posibilidad de construir estructuras de retención de sedimento, ya que nos indican hasta que cota debemos llegar si queremos interceptar ciertos porcentajes del transporte litoral potencial generado por la acción de las olas.

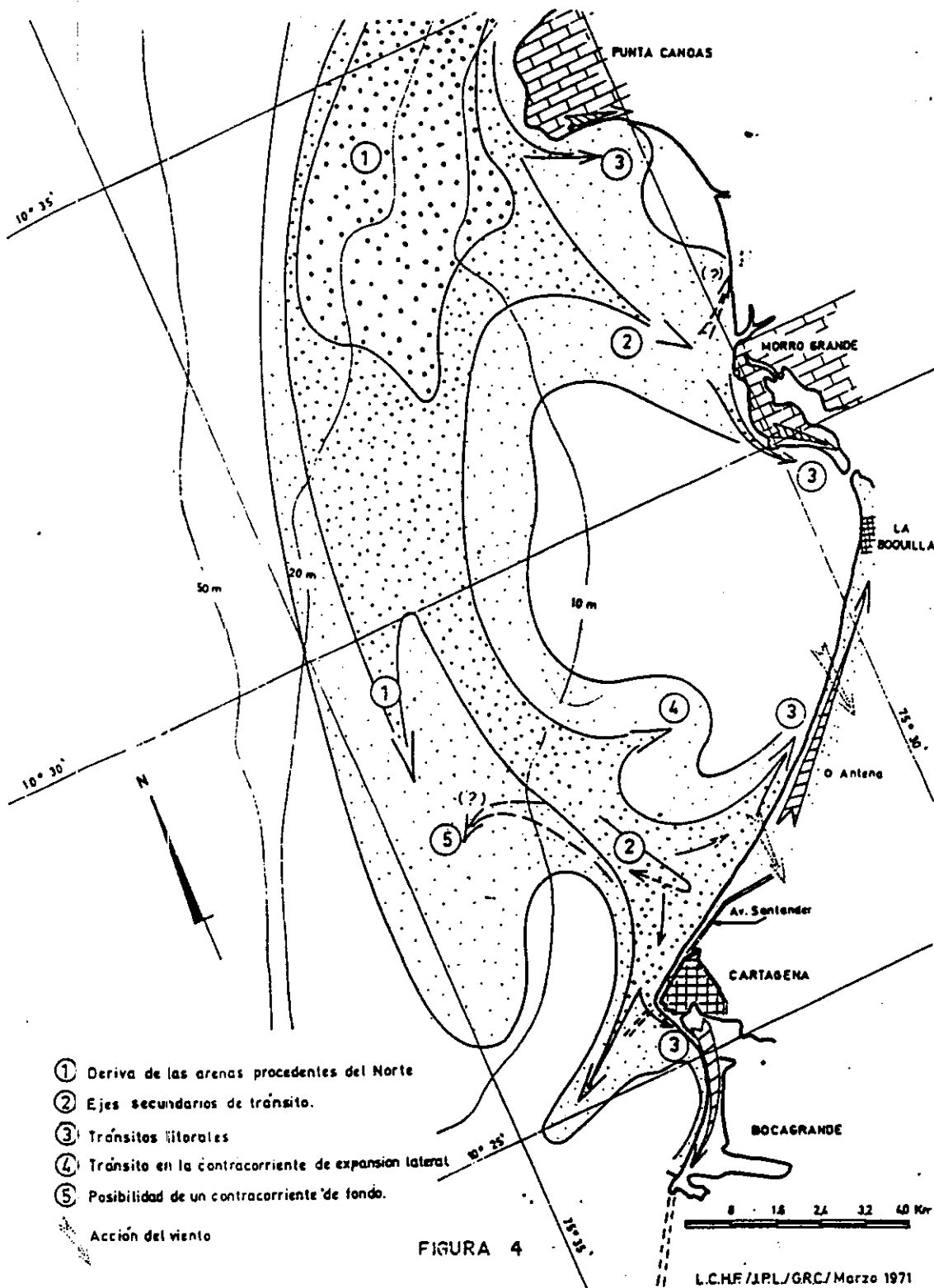
8.2.5 Esquema de migración de las arenas hacia el sector de Bocagrande

De acuerdo con el estudio "Playas de Cartagena. Estudio en modelo reducido" de 1.972, podemos considerar el proceso global de transporte sedimentario para el litoral de Cartagena como una integración de los siguientes procesos (Ver figura No 40):

- Hay deriva general de los aportes en procedencia del Norte.
- Con el afloramiento rocoso de Punta Canoas, los oleajes fomentan dos ejes secundarios de transporte dirigidos, uno hacia Morro Grande y el otro hacia la zona del Cabrero.
- Debido a los efectos de refracción del oleaje sobre los fondos y de la difracción alrededor de Punta Canoas, Los Morros y Santo Domingo la oblicuidad de las olas fomentan tránsitos litorales en la zona de rompimiento.

157

FIGURA No 40.



De lo anterior, así como del análisis de oleaje que hemos realizado podemos inferir que la fuente de sedimentos del Sector de Bocagrande es la deriva litoral de arenas que proceden del Norte, hecho que confirma la geomorfología del sector, ya que Bocagrande es una espiga o flecha litoral que se descuelga a partir del Sector de Santo Domingo en dirección Noreste-Suroeste.

8.2.6 Análisis de antecedentes en tendencias de transporte de sedimentos

De acuerdo con el Estudio “Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y el Laguito 1.983-1.989”, en su sección de análisis de volúmenes de erosión y sedimentación se presentó el siguiente comportamiento del movimiento de sedimentos entre 1.983 y 1.989, en los sectores Espolón Iribarren-Hotel Caribe (Sector 1), entre el Hotel Caribe y el espolón de la Calle 6ª (Sector 2) y entre el espolón de la Calle 6ª y Hotel Capilla del Mar (Sector 3) que se presentan en las tablas No 25, No 26 y No 27 y las Figuras No 41, 42 y 43.

TABLA No 25. VOLUMENES DE EROSION Y SEDIMENTACION.

JULIO 83-FEBRERO 88

| SECTOR | 1 | 2 | 3 | TOTAL |
|------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| LONGITUD TRAMO | 300 | 500 | 400 | 1200 |
| VOL NETO (M3) | -19600 | +52900 | +106800 | +140100 |
| CAMBIO DE VOLUMEN (M3/M/AÑO) | -14,26 | +23.1 | +58.29 | +25.49 |

TABLA No 26. VOLUMENES DE EROSION Y SEDIMENTACION.

FEBRERO 88-AGOSTO 88

| SECTOR | 1 | 2 | 3 | TOTAL |
|----------------|--------|--------|--------|---------|
| LONGITUD TRAMO | 300 | 500 | 400 | 1200 |
| VOL NETO (M3) | +54700 | +59400 | +25800 | +139900 |

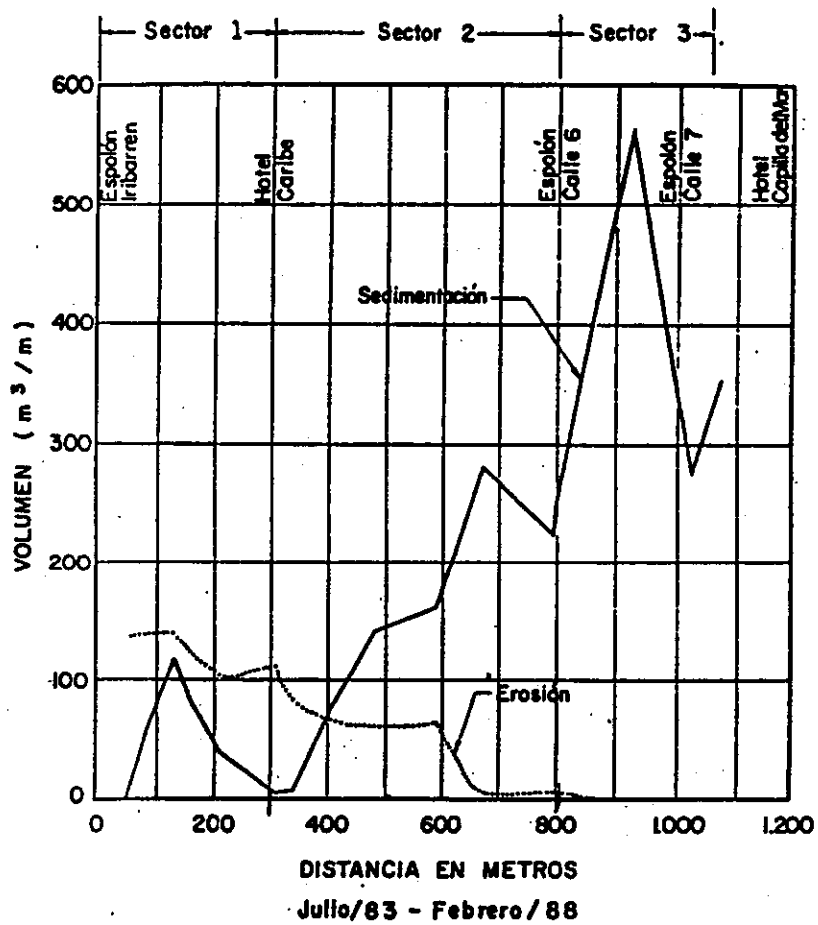
TABLA No 27. VOLUMENES DE EROSION Y SEDIMENTACION.

AGOSTO 88-ABRIL 89

| SECTOR | 1 | 2 | 3 | TOTAL |
|------------------------------|---------|--------|--------|---------|
| LONGITUD TRAMO | 300 | 500 | 400 | 1200 |
| VOL NETO (M3) | -60200 | -40400 | -16800 | -117400 |
| CAMBIO DE VOLUMEN (M3/M/AÑO) | -133.77 | -53.28 | -27.72 | -64.57 |

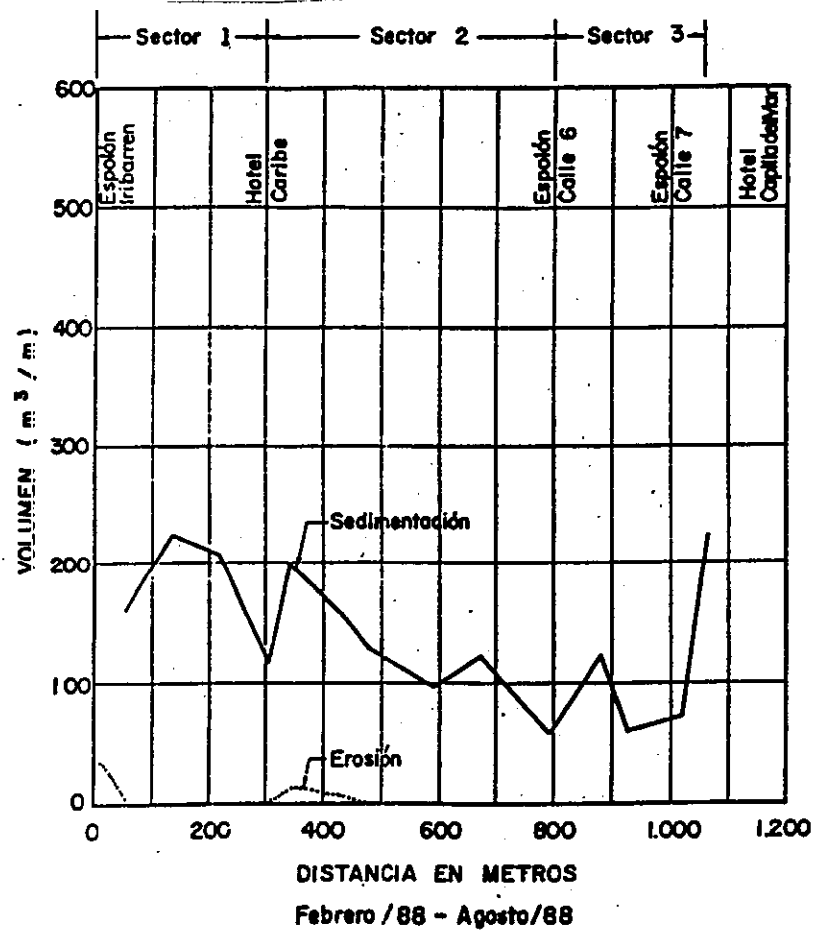
Fuente: Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y El Laguito. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 1.989.

FIGURA No.41. VOLUMENES DE EROSION SEDIMENTACION DE BOCAGRANDE. JULIO 1.983-FEBRERO 1.988



Fuente: Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y el Laguito 1.983-1.989. Laboratorio de Ensayos Hidráulicos del Ministerio de Obras Publicas y Transporte.

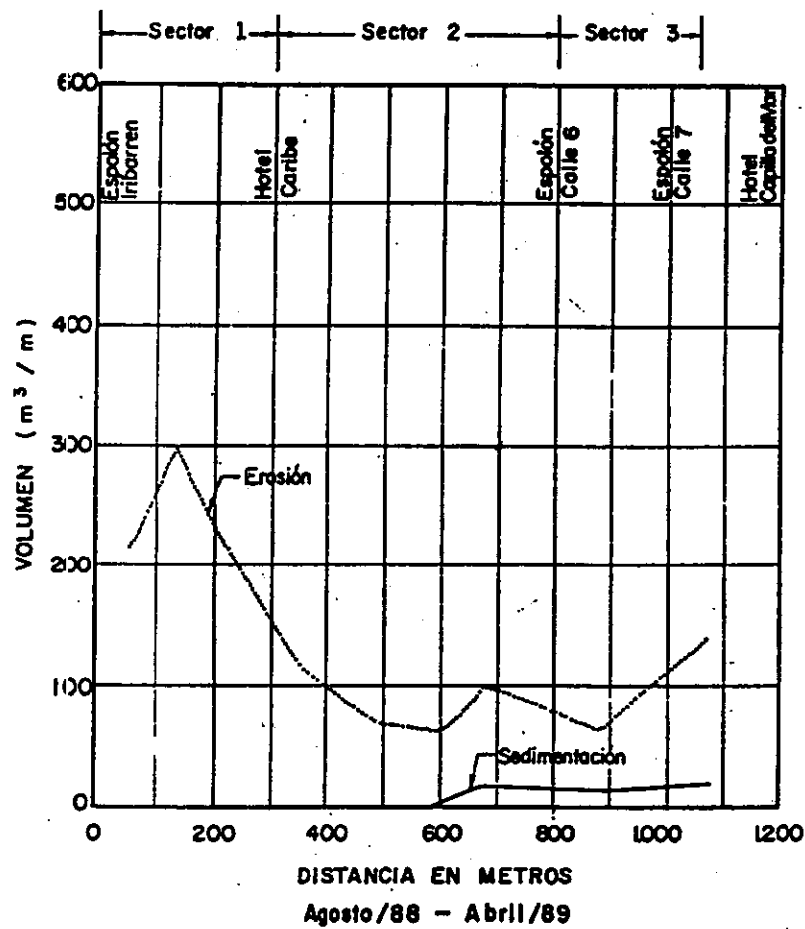
FIGURA No.42. VOLUMENES DE EROSION SEDIMENTACION DE BOCAGRANDE.FEBRERO 1.988-AGOSTO 1.988



Fuente: Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y el Laguito 1.983-1.989. Laboratorio de Ensayos Hidráulicos del Ministerio de Obras Publicas y Transporte.

FIGURA No.43. VOLUMENES DE EROSION SEDIMENTACION DE BOCAGRANDE. AGOSTO 1.988-ABRIL 1.989.

162



Fuente: Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y el Laguito 1.983-1.989. Laboratorio de Ensayos Hidráulicos del Ministerio de Obras Publicas y Transporte.

De acuerdo a lo anterior la tendencia al cambio de volumen de sedimentos entre julio de 1.983 y febrero de 1.988 se vio dirigida hacia la acresión en los sectores entre el Hotel Caribe y el Hotel Capilla del Mar y hacia la erosión entre el espolón Iribarren y el Hotel Caribe. Estos datos nos son especialmente valiosos pues parametrizan la evolución del sector en un lapso de 4 años y medio, y para nuestro estudio los datos más interesantes son los que nos muestren tendencias a largo plazo.

El lapso de febrero de 1.988 a agosto de 1.988 se caracterizó por una acresión generalizada en todos los sectores.

El periodo de agosto de 1.988 a abril de 1.989 se vio caracterizado por fuertes tendencias erosivas en especial entre el espolón Iribarren y el Hotel Caribe, estos valores responden al cambio de volumen generado por el paso del Huracán Joan en octubre de 1.988 y los mares de leva subsiguientes que intensificaron los procesos erosivos.

En el mismo estudio se hace mención de que a nivel global entre el comienzo de la década de los 80 y el año 89, en el sector comprendido entre el Hotel Caribe y el Edificio Seguros Bolívar ha habido una sedimentación neta de unos 250.000 m³.

8.3 MODELACION MATEMATICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y CAMBIO DE LINEA DE COSTA CON GENESIS.

8.3.1 Preparación para correr Génesis.

8.3.1.1 Sistema de Referencia

Para todas las modelaciones en GENESIS se debe delimitar la zona de línea de costa que queremos estudiar, en ella se traza una línea base que sirva de eje horizontal, dicho eje x se extenderá a lo largo de la línea de costa, es decir servirá de referencia a coordenadas a lo largo de la costa en el centro de las celdas que el modelo utiliza para encontrar solución numérica a las ecuaciones que le son propias. Perpendicular a este se debe trazar un eje que avanzara desde la línea de costa hacia el mar, sirviendo de referencia a coordenadas fuera de la costa. Se debe escoger un sistema métrico, ya sea el M.K.S o el ingles. Con este trazado de ejes cada punto de la línea de costa se referencia con una posición a lo largo de la costa y otra fuera de la costa, lo cual es vital para este tipo de modelaciones.

En nuestro caso se utilizaron planos topográficos y batimétricos del tramo comprendido entre el Espolón Iribarren y el Sector El Limbo, las batimetrías y líneas de costa utilizadas se obtuvieron del Plano batimétrico de Bocagrande 1.988 del Ministerio de Obras Publicas y Transporte (Figuras 21 y 22) y del Plano batimétrico de Bocagrande de 1.996 realizado por el Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental de la Universidad de Cartagena (Figuras 23 y 24).

La información de estos planos se redujo a uno solo con escala 1:2.000 en el que se trazó un sistema de referencia de ejes coordenados, buscando que el eje horizontal quedara lo suficientemente lejos de la línea de retroceso de la línea de costa.

8.3.1.2 Consideraciones en cuanto a archivos de entrada y salida de datos

GENESIS es operado a través del uso de unos archivos de entrada, los cuales son:

START: Este archivo controla en forma general el proceso de la modelación, ya que en el se establecen los límites en el espacio y el tiempo de modelación, características del oleaje, de las playas y de las estructuras de protección, entre otros aspectos.

SHORL: Guarda las posiciones iniciales de la línea de costa

SHORM: Guarda la posición de la línea de costa utilizada como parámetro de comparación en el proceso de calibración y verificación.

SEAWL: Este archivo guarda las posiciones de uno o más muros que se encuentren dentro de la playa modelada.

DEPTH: Este archivo opcional es leído por el modelo solo si en el archivo START se aclara que se esta usando un modelo externo de transformación de oleaje, contiene las profundidades de los puntos que forman parte de una línea de referencia cercana a la costa.

WAVES: Este archivo guarda la información de oleaje que dirige la simulación de cambio de la línea de costa.

NSWAV: Archivo opcional, es leído solo en caso de que se especifique que se utilizaran datos del Modelo Externo de Transformación de oleaje. Contiene los parámetros de oleaje en una línea de referencia cercana a la costa obtenidos a partir de la rutina RCPWAVE.

En cuanto a los archivos de salida del GENESIS, estos son colocados en tres archivos: **SETUP, OUTPT Y SHORC.**

SETUP: Este archivo contiene los parámetros generales de la modelación introducidos en el START, la posición final de la línea de costa, contiene además el error de calibración/verificación y los mensajes de eventuales errores que hallan podido afectar la modelación.

OUTPT: Los datos guardados en este archivo son: Posición de línea de costa calculada para la condición final, volumen de arena transportado a lo largo de la costa para cada punto de la malla, expresado como volumen por año y Rata de transporte en cada punto a lo largo de

la costa para la fecha final de modelación.

SHORC: Este archivo guarda la posición final de la línea de costa calculada por el modelo. Este archivo puede ser utilizado si se desea como SHORL o como SHORM en futuras modelaciones.

8.3.1.3 Manejo de Información de oleaje para la modelación.

La información de oleaje utilizada en cuanto a oleaje Mar Afuera fue la descrita en las Tablas 12 a 21, de allí se obtuvo los porcentajes de ocurrencia de cada condición de oleaje, en cuanto a condiciones en aguas intermedias y someras se utilizó la información consignada en la Tabla No 24, que fue dedicada al análisis del oleaje cerca de la costa.

Se decidió tomar como profundidad de referencia de los datos a la cota -5.00 mts, ya que es grande la transformación que ocurre entre esta y aguas profundas.

Con base en la información antes mencionada se elaboraron los archivos de entrada de oleaje WAVES, para cada modelación, en estos archivos la altura de ola es expresada como altura de ola significativa, el periodo en segundos y los ángulos son expresados en grados, estos ángulos son medidos a partir de una línea perpendicular a la línea base de GENESIS como se muestra en la Figura No 14.

8.3.1.4 Información sobre granulometría.

El dato del D50 representativo del sector es uno de los datos de entrada de los archivos tipo START, para Bocagrande se tomó el valor calculado de 0.1452 mm.

8.3.2 Calibración del modelo.

Se considera que el modelo está calibrado cuando los coeficientes K1 y K2 de la fórmula (12) son capaces de dirigir la modelación de manera tal que la línea de costa calculada (archivo SHORC) tenga una clara tendencia de aproximación a la línea de costa medida usada como parámetro de comparación (archivo SHORM). Esto considerando que las líneas de costa suministradas, así como los datos de la playa (altura de la berma, profundidad de cierre, diámetro medio de las partículas), los datos relacionados con las estructuras (medidas, parámetros de permeabilidad y reflexión) y el oleaje sean confiables. En nuestro caso usaremos para la calibración líneas de costa de 1.988 (SHORL) y 1.996 (SHORM), modelando a lo largo de 8 años.

-Orientación de los ejes:

Se le dio al eje de las Y una desviación de 20° respecto al Norte en sentido antihorario.

Este eje vertical es además la línea de referencia para la medición de los ángulos de aproximación de oleaje en GENESIS.

-Origen del sistema de coordenadas:

Se ubicó a la altura de la Calle 7oa, coincidiendo con la proyección vertical del Espolón E4.

-Características de la malla:

A partir de dicho origen se estableció sobre la línea de referencia un abscisado cada 20 mts, completándose 100 celdas en total. La zona considerada para la calibración del modelo cubrió el sector ubicado entre la Calle 7ª en Bocagrande y el borde de agua ubicado frente al Baluarte de Santo Domingo en el Centro, se escogió esta zona por que se tienen evidencias de que no ha recibido rellenos ni dragados en los últimos 8 años.

-Condiciones de borde:

La condición de borde Izquierda es el espolón E4, el cual es un limite tipo compuerta, cuyo comportamiento dependerá de los siguientes parámetros: valor de la permeabilidad del espolón (GENESIS considera totalmente permeable un espolón con una permeabilidad de 1 e impermeable a uno con un valor de permeabilidad de 0), su longitud, la distancia entre la línea de costa y el extremo del espolón y la profundidad en su punta.

La condición de borde derecha es una playa de condición estable (solo existen esas dos condiciones de borde en GENESIS), requisito que cumple muy bien el sector final del abscisado pues esta estabilizado por un muro.

-Consideraciones en cuanto a las estructuras:

Se introdujo en los archivos START de calibración el valor de los parámetros asociados al espolón que sirve de condición de borde izquierda. En cuanto a los cinco rompeolas entre el limbo y el espolón E4, se les esquematizo como un enrocado, ya que su funcionamiento hidrodinámico de acuerdo a observaciones en campo y a la luz de la teoría de diseño de playas estabilizadas con rompeolas es el de un enrocado, ya que las playas han llegado en ese sector a una condición de equilibrio. El tramo de enrocado entre el sector el Limbo y el Baluarte de Santo Domingo fue considerado como tal en los archivos START Y SEAWL, al igual que los rompeolas antes mencionados.

Los espolones desde el E5 al E9 no fueron considerados para el análisis ya que por sus características (escasa longitud, poca altura sobre el nivel del agua, rebase de olas por encima de la coraza y avanzado estado de deterioro) no están cumpliendo con su función de retener sedimento. Los espolones entre el sector El Limbo y el Baluarte de San Francisco Javier no fueron considerados para la modelación por la inestabilidad que generarían en el modelo estas estructuras en un sector que tiene una gran inclinación de línea de costa respecto a la línea base utilizada.

Esta esquematización de las estructuras implica que debemos subestimar los valores de sedimentación que reporte el modelo entre su condición de borde derecha y el sector el Limbo.

-Parámetros de calibración K1 y K2. Estos valores deben estar cumpliendo la relación: $0.1 < K1 < 1$ y $0.5 K1 < K2 < 1.5 K1$. Para la calibración del modelo se probó con los valores más bajos, ya que esta es una zona que presenta grandes concentraciones de oleaje, y con valores muy grandes de K1 se pueden generar distorsiones en el proceso de modelación.

-Profundidad de Cierre (D_c).

Entendida esta profundidad como aquella en la que ya no existe un transporte significativo de material.

De acuerdo al manual de referencia de GENESIS “La profundidad de cierre es un parámetro difícil de cuantificar. Empíricamente, este valor no puede ser determinado con confianza, puesto que cambios batimétricos pequeños en aguas de cierta profundidad son extremadamente difíciles de medir.”

“Hallermeier (1983) halló que el máximo límite mar adentro de la zona litoral podría expresarse por la ecuación de “profundidad máxima de transporte longitudinal” si la altura de ola y el periodo se corresponden con los promedios de olas significantes más altas que ocurren durante 12 horas a lo largo del año”. La profundidad de cierre se obtendría a partir de la ecuación:

$$D_{LT_0} = \left[2.3 - 10.9 \frac{H_0}{L_0} \right] H_0 \quad (14)$$

Donde las condiciones de oleaje están planteadas para aguas profundas.

De acuerdo al documento "Curso Internacional de Morfodinámica de Playas" del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria de 1.996 :
"Birkemeier (1.985) utilizando numerosos datos medidas de perfiles de playa obtuvo una expresión modificada para la profundidad de cierre resultando:

$$D_c = 1.57 H \quad (15)$$

Donde H es la altura de ola local que es excedida doce horas al año."

"El límite de definido por Birkemeier puede interpretarse como la zona de rotura de correspondiente a un temporal que es excedido doce horas al año".

De acuerdo a nuestra estadística (Ver Tabla No.12) una ola que sea superada solo 12 horas al año debe estar en el rango de los 7 a 8 metros de altura en aguas profundas.

Tomando como base una ola Noreste con estas características de altura, y con un periodo de 8 segundos, el análisis de refracción hecho por RCPWAVE nos indica que se obtiene una altura de rotura de 2 metros y una profundidad de rotura de 5 metros.

Atendiendo al criterio planteado por Birkemeier, muestra profundidad de cierre seria definida por la profundidad de rotura de dicha ola, es decir nuestro D_c sería de unos 5 metros.

De acuerdo al documento "Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y El Laguito". Ministerio de Obras Publicas y Transportes. 1.989. Pagina 4 "...en los distintos levantamientos batimetricos efectuados en la zona, se ha notado que a partir de dicha profundidad (4 metros) los contornos regulares del fondo dan lugar a contornos irregulares indicando la transición local entre la zona cercana a la costa por donde las arenas son movidas por las olas en cantidades significativas y las zonas lejanas a la costa donde la arena se mueve en menores cantidades".

Considerando lo anterior y los cálculos realizados a través de el criterio de Birkemeier se puede decir que un valor de 5 metros para D_c es una aproximación razonable.

La calibración se dividió en dos partes:

a)Lo primero que se realizó fue la modelación de tendencia de la línea de costa con todas las condiciones de oleaje que arriban a Bocagrande . Los frentes de olas probados en estas series de modelación fueron los considerados en la Tabla No 24. Estas modelaciones consistieron en evaluar los efectos de las condiciones de oleaje más interesantes a nivel de variación en la línea de costa (archivos SHORC Y OUTPT) y sentido de los transportes (archivo OUTPT).

"ANALISIS DE LAS TENDENCIAS DE EVOLUCIÓN DE LA LINEA DE COSTA Y PROTECCIÓN DE LAS PLAYAS DE BOCAGRANDE. TRAMO ESPOLÓN IRIBARREN-SECTOR EL LIMBO"

El porcentaje de ocurrencia que se les asigno a cada uno es el que les fue calculado y presentado en la Tabla No 24, el resto del clima de oleaje en estas simulaciones se considera como calma para evaluar los efectos netos del oleaje analizado.

Se modeló para cada oleaje entre 1.988 y 1.996. En esta parte se trabajo con parámetros K1 y K2 supuestos, por lo cual solo podemos inferir tendencias de dirección de los transportes y posibles variaciones en la línea de costa, todo esto a nivel netamente cualitativo.

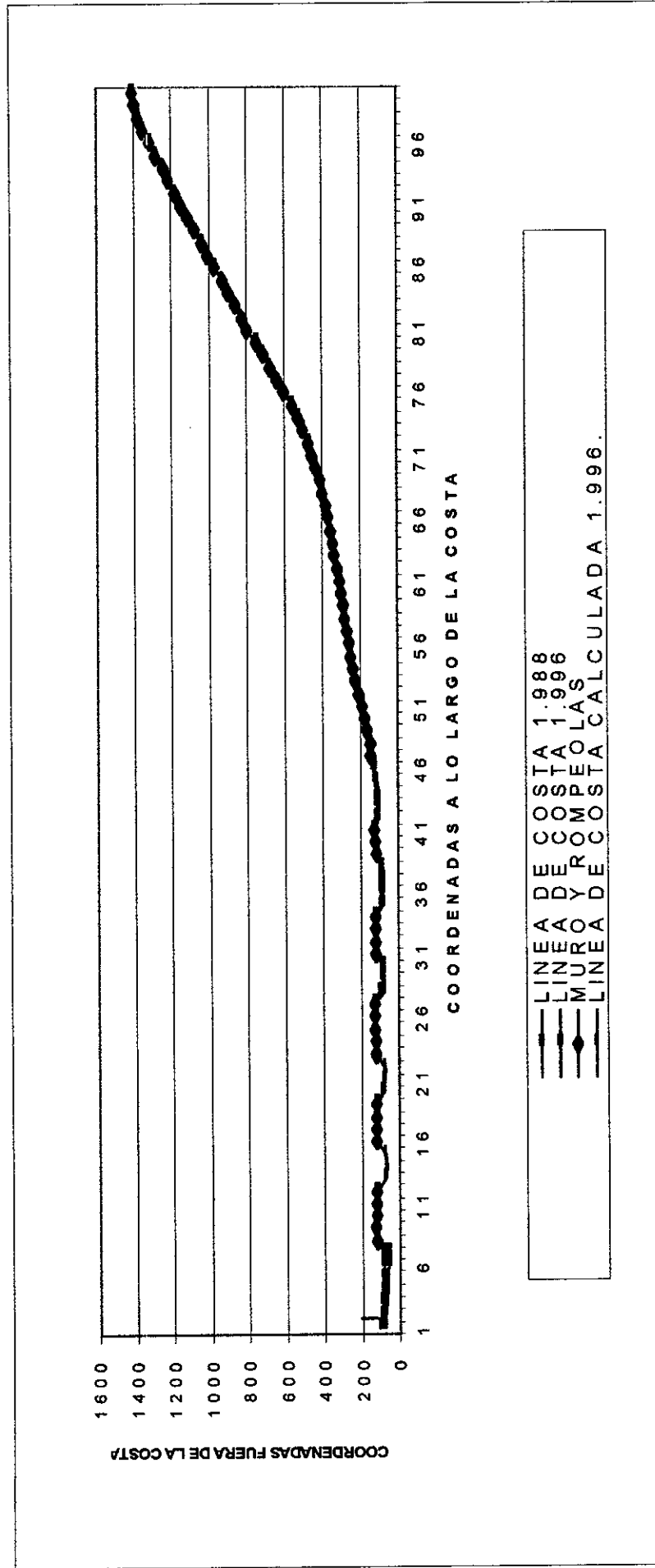
En estas modelaciones se encontró lo siguiente:

Los oleajes NE de periodos 4, 5 y 6 segundos generan transportes hacia la derecha entre las abscisas 1 y 7 y hacia la izquierda de la abscisa 15 en adelante, con muy leves variaciones en la magnitud, provocándose por esto escasa variación en la línea de costa. (Ver Figuras 44,45 y 46).

En cuanto al oleaje NE de 7 segundos, genera transportes hacia la derecha entre la abscisa 0 y 8 disminuyendo de izquierda a derecha observándose por esto acresión cerca del rompeolas que comienza en la abscisa 8, también genera transporte hacia la izquierda entre las abscisas 20 y 47 disminuyendo de derecha a izquierda presentándose por esto acresión en ese tramo. Se presenta escasa variación en los transportes frente a los sectores en muro. (Ver Figura 47)

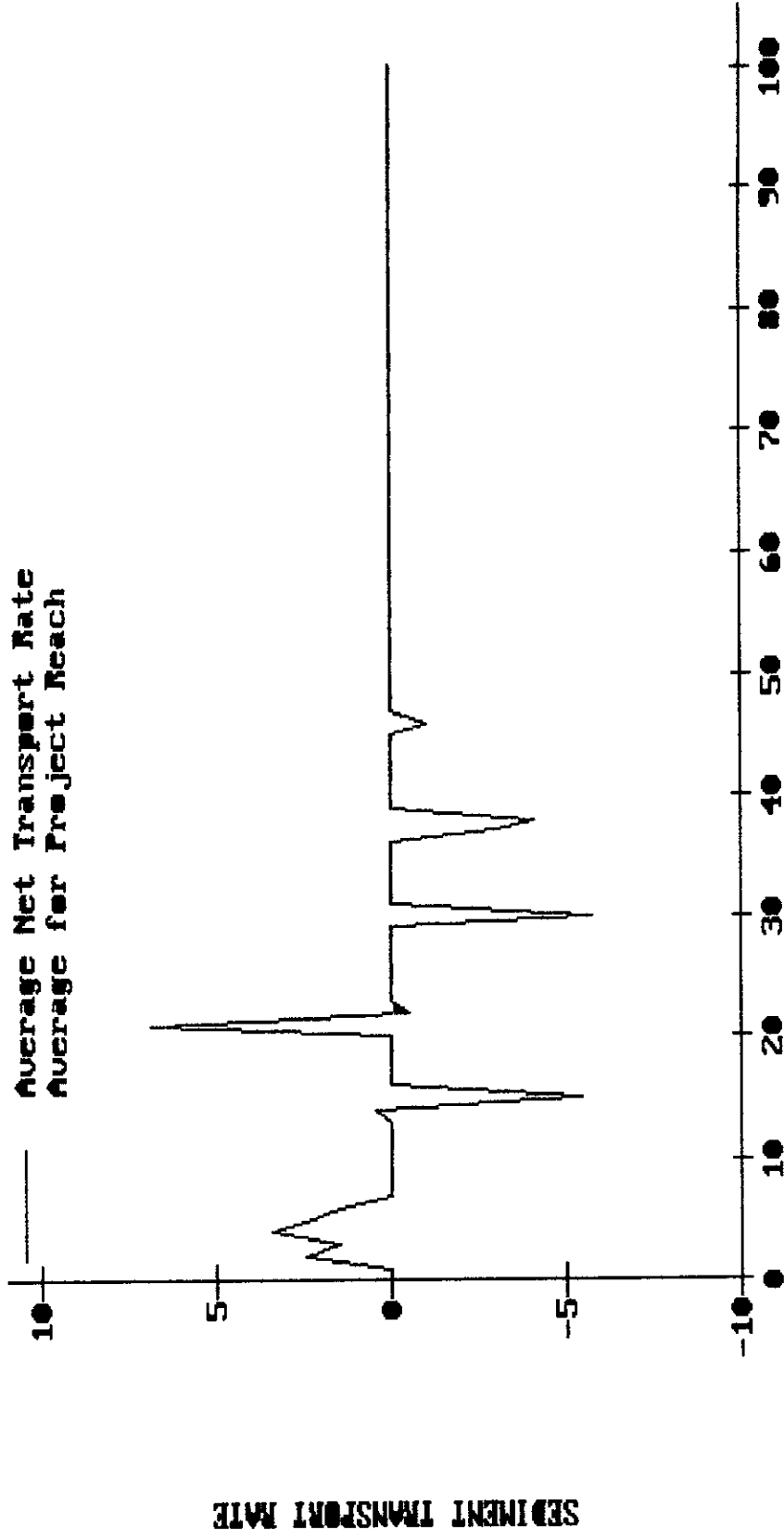
FIGURA No. 44.1.1. MODELACION OLEAJE NORESTE T=4 SEG. 1.998-1.996.
 VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

175.



176

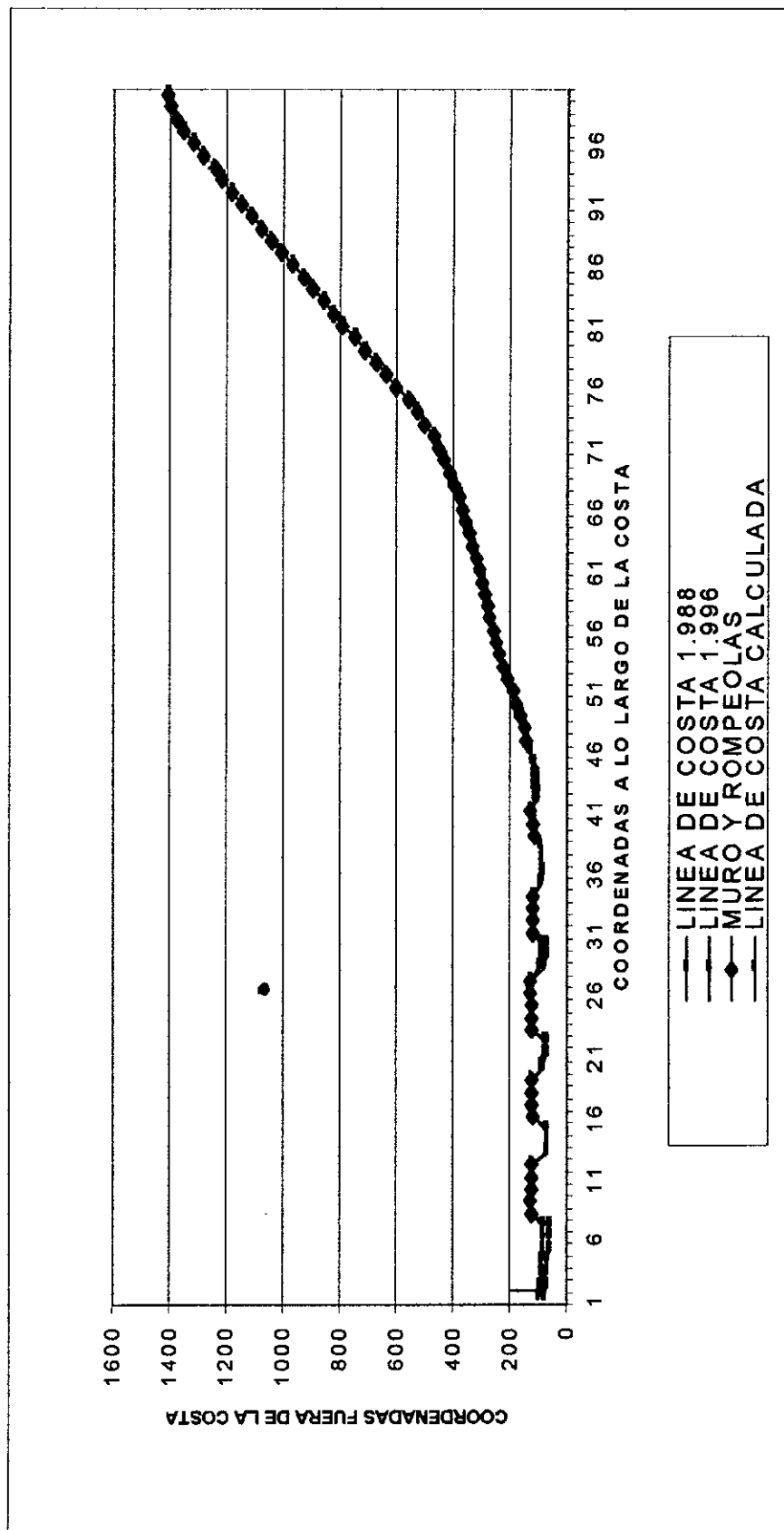
FIGURA. N° 44.2 MODELACION DE OLEAJE NE 1988-1996 T=4s.
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .



Nota: Unidades en metros cúbicos.

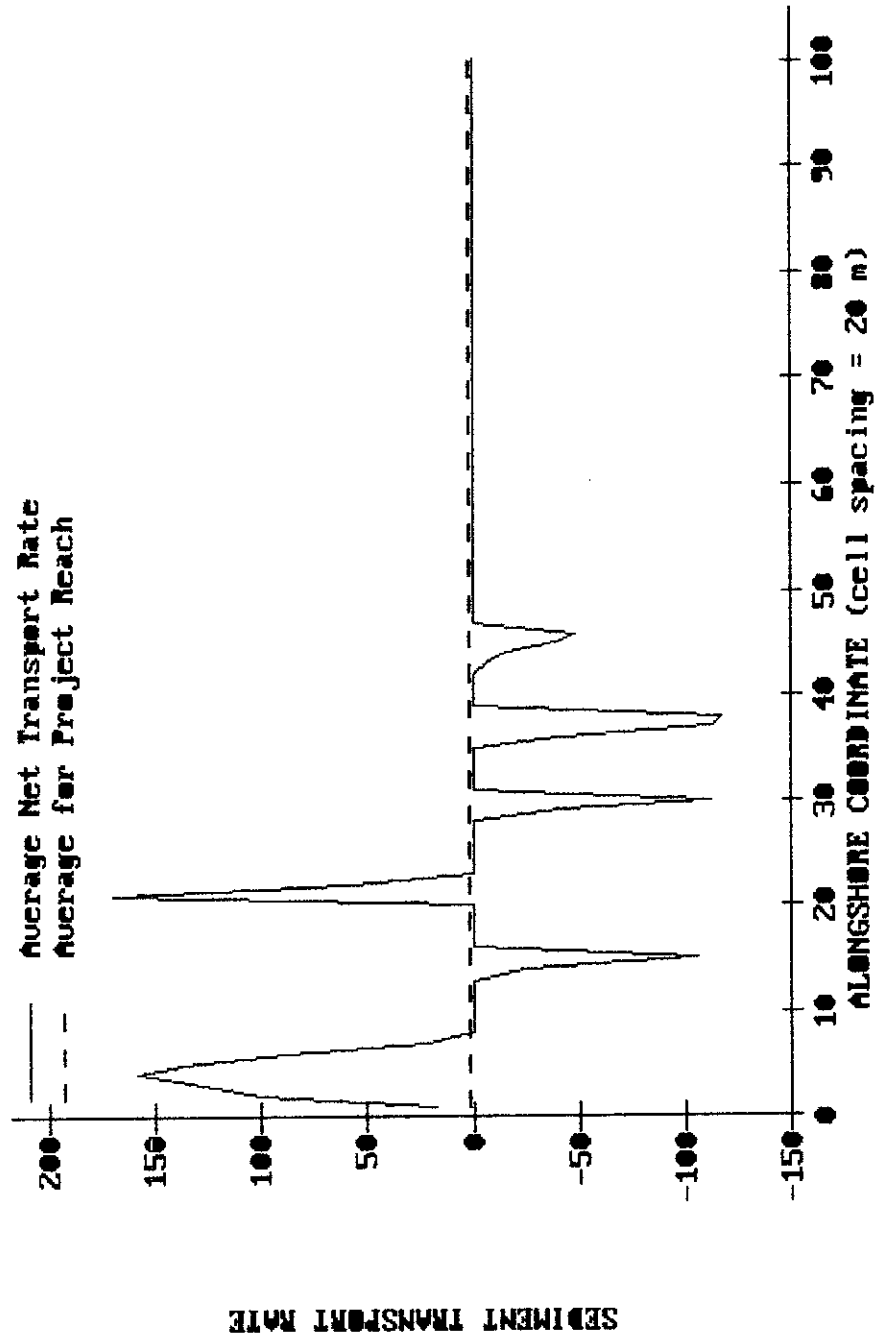
177.

FIGURA No 45.1. MODELACION OLEAJE NORESTE T= 5 SEG. 1.988-1.996.
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.



AP.

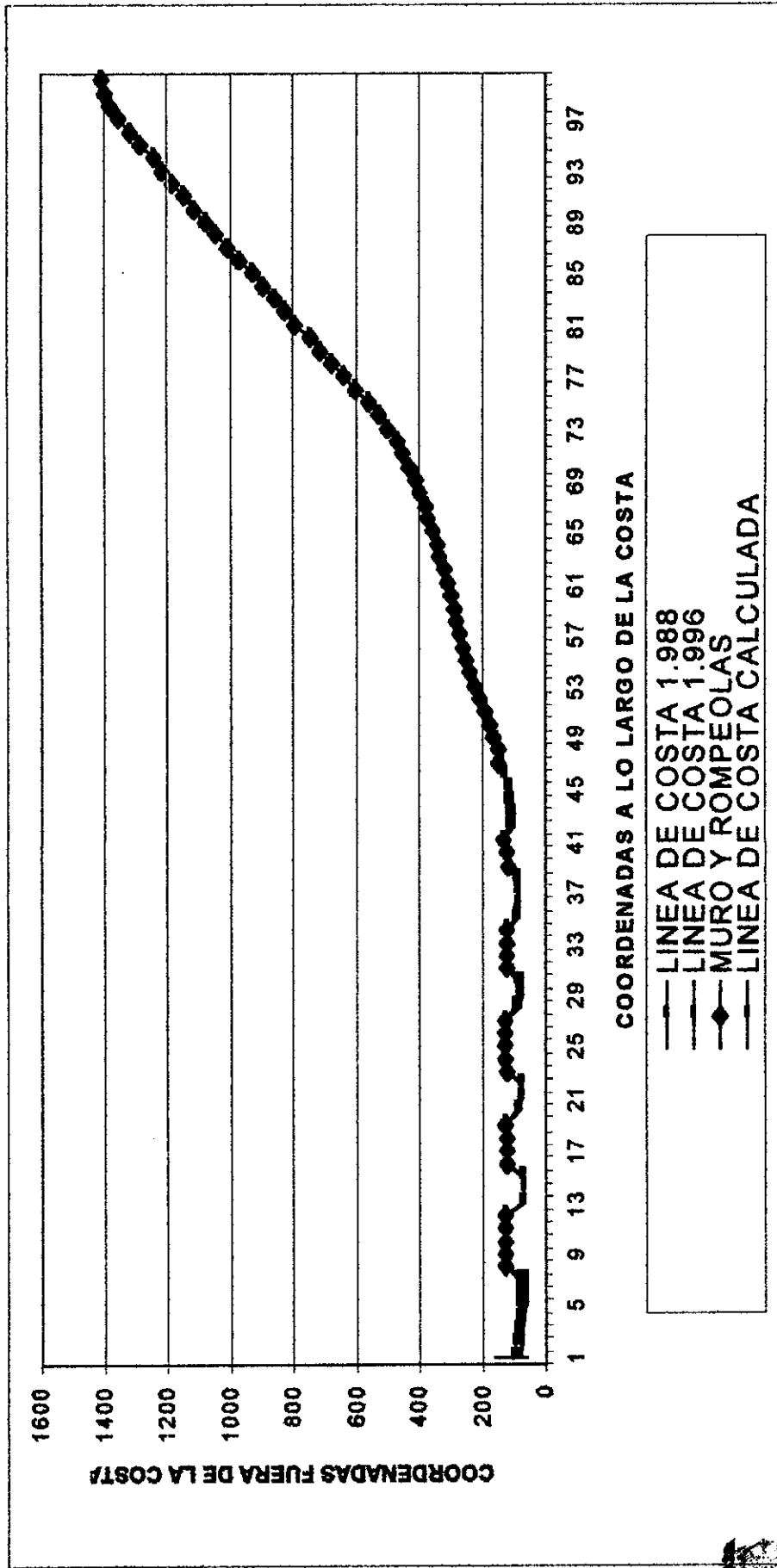
FIGURA No 45.2. MODELACION DE OLEAJE NE 1988-1996 T=5s.
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .



Nota: Unidades en metros cúbicos.

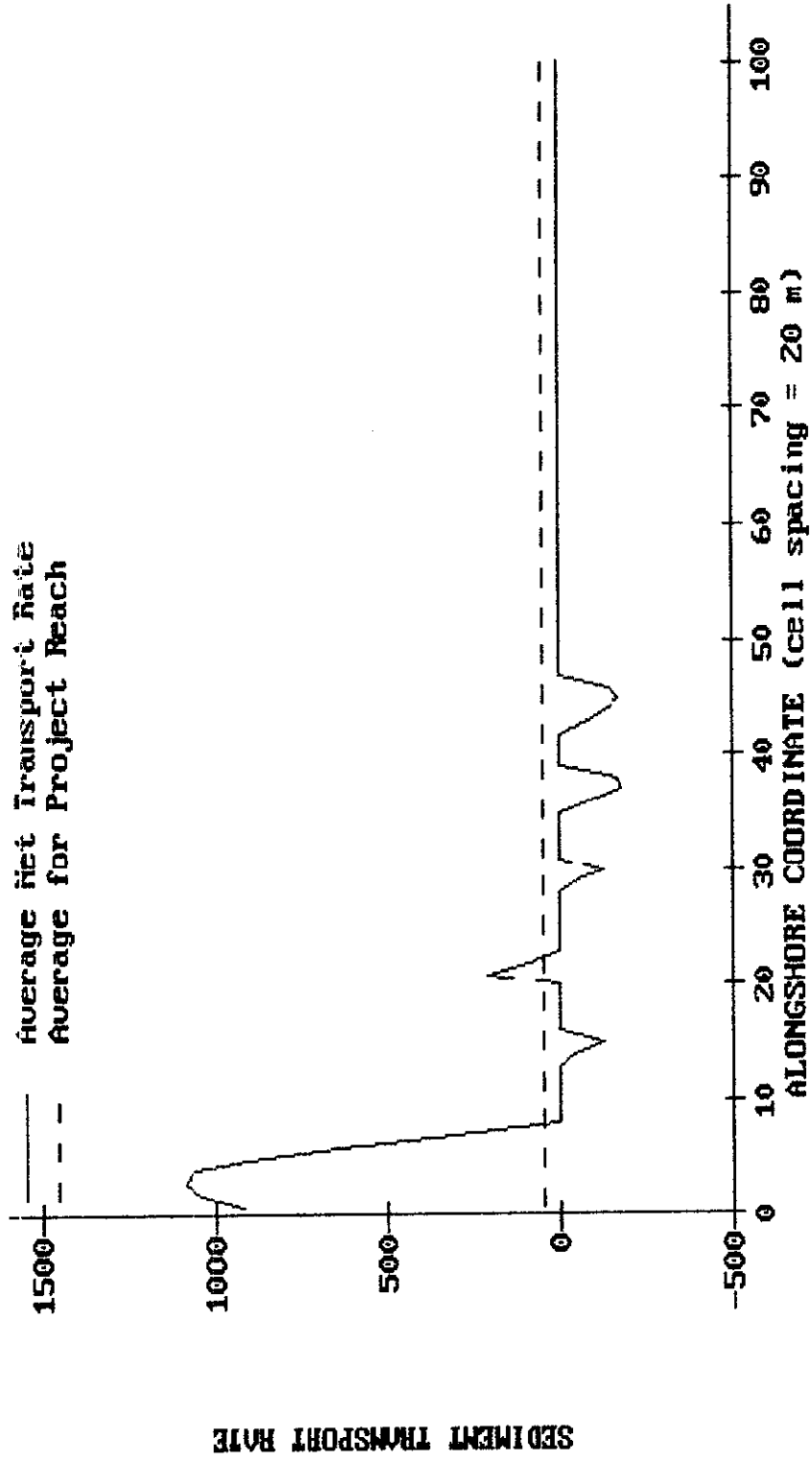
179.

FIGURA No 46.1.MODELACION OLEAJE NORESTE T= 6 SEG. 1.988-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.



180.

FIGURA. No 46. 2. MODELACION OLEAJE NE 1988-1996 T=6s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .



Nota: Unidades en metros cúbicos.

181

FIGURA No 47.1.1. MODELACION OLEAJE NORESTE T=7 SEG. 1.998-1.996.
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

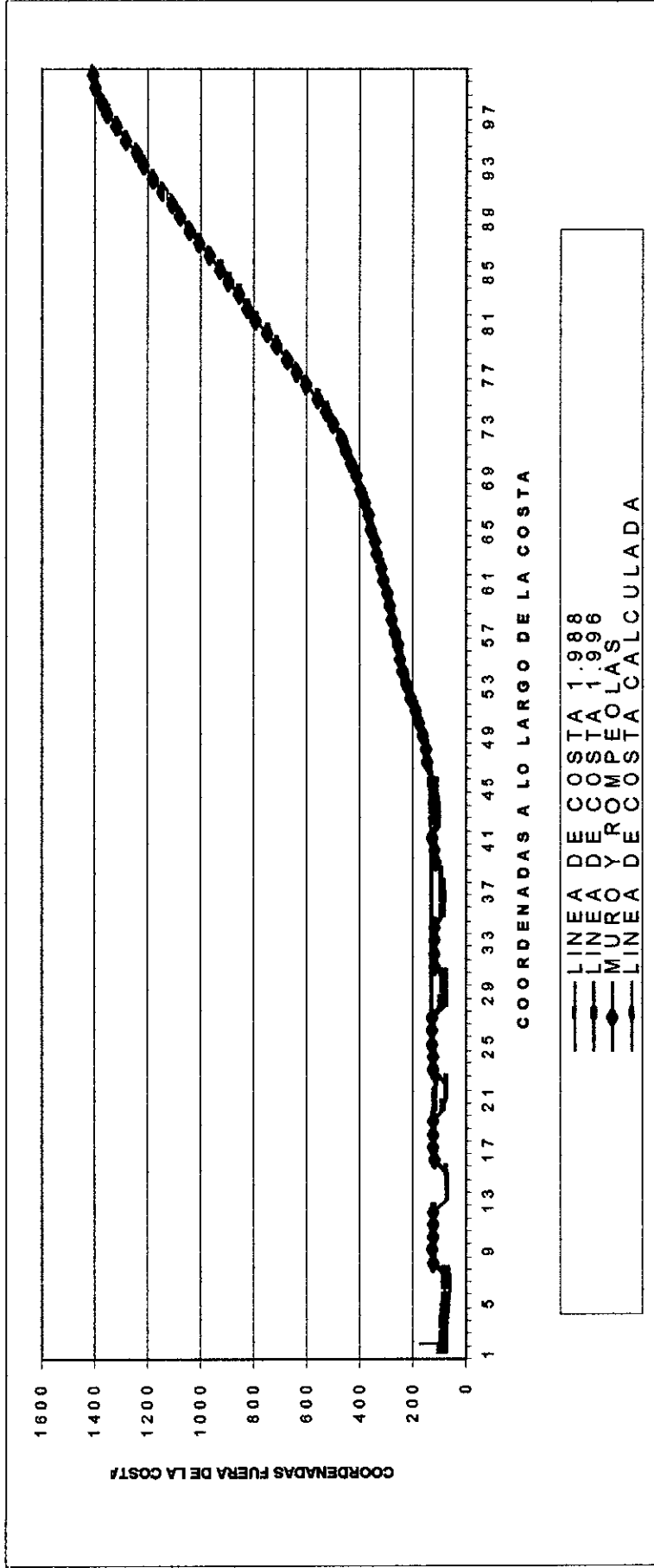
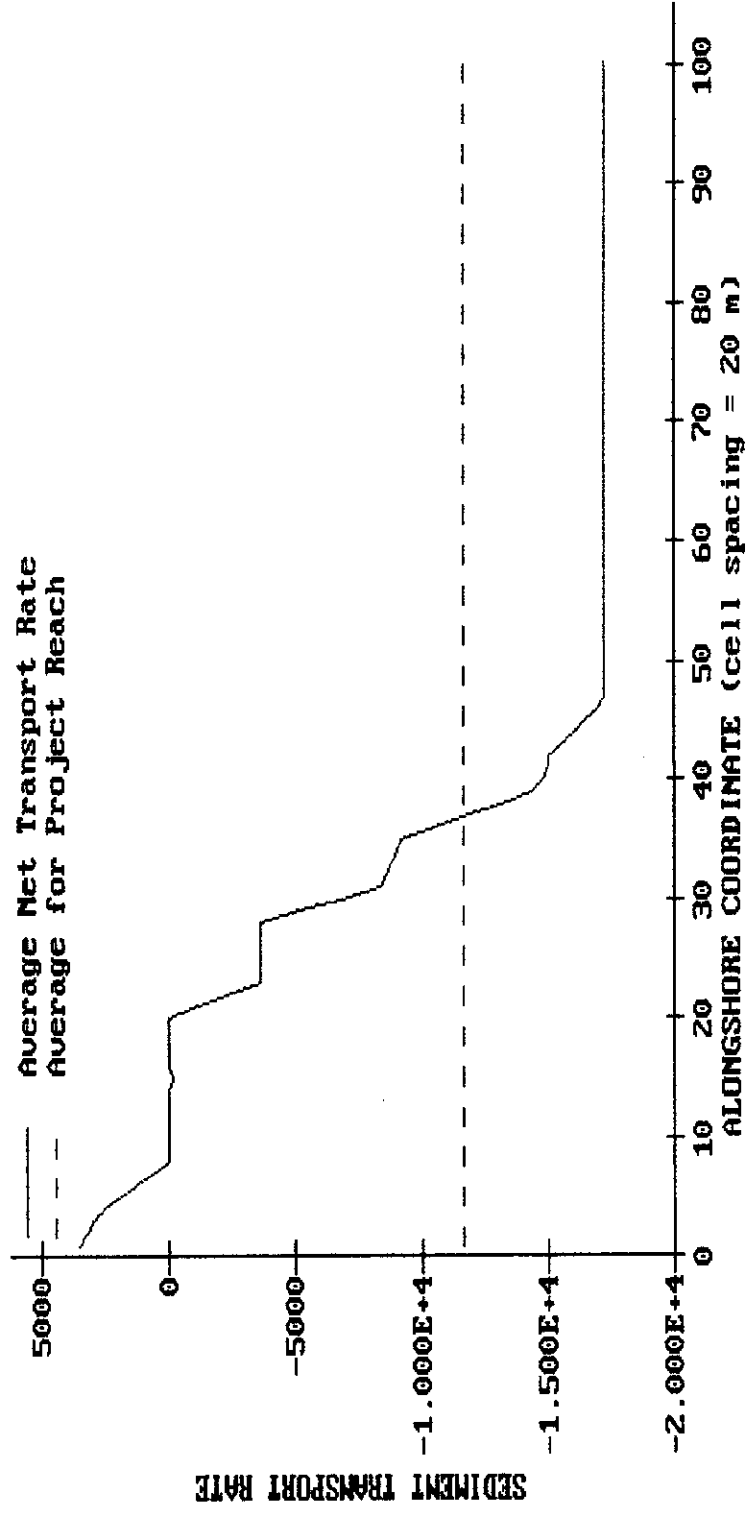


FIGURA. No 47.2. MODELACION DE OLEAJE NE 1988-1996 T=7s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.



Nota: Unidades en metros cubicos.

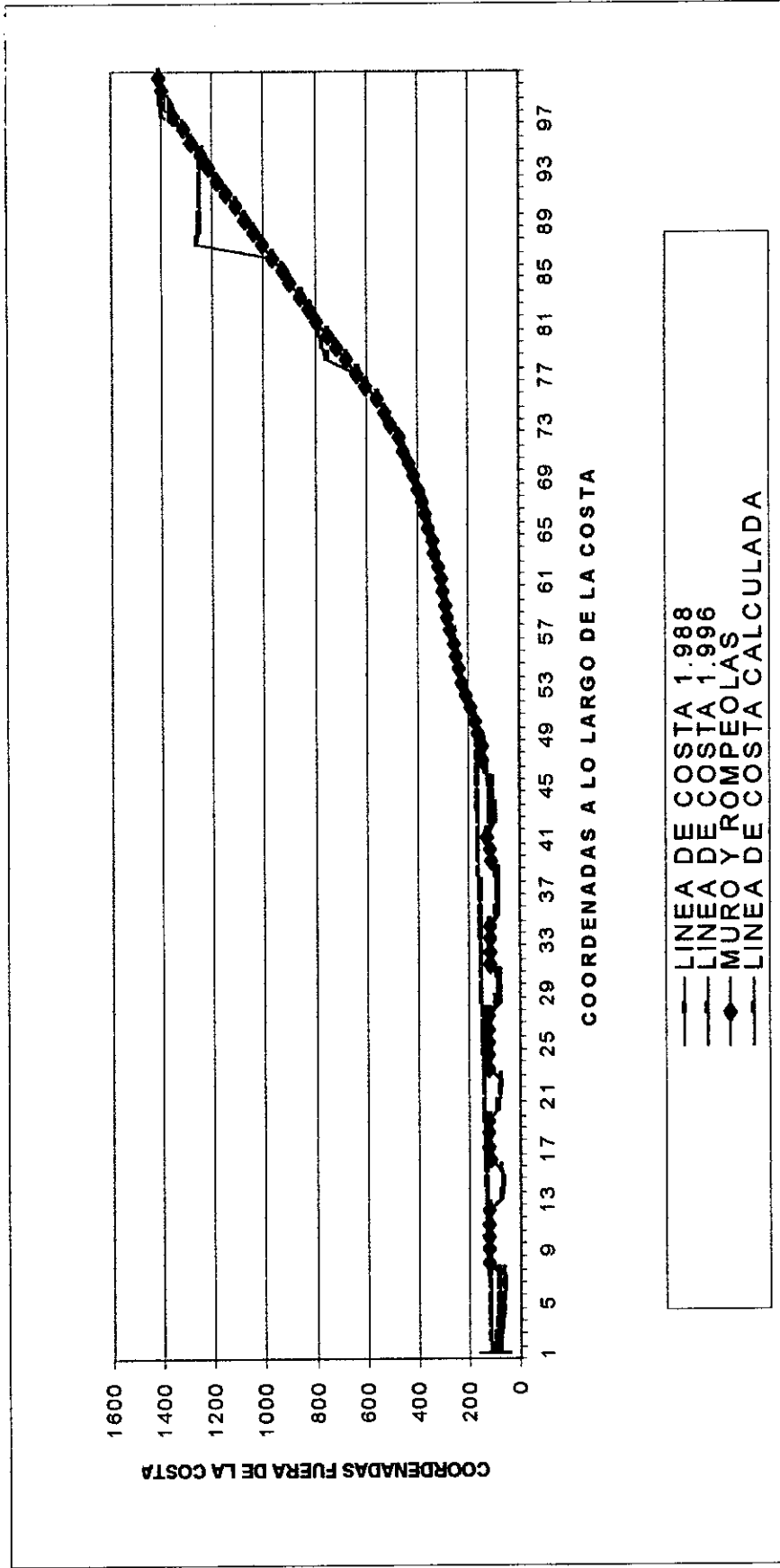
El oleaje NE de periodo 8 segundos, provoca transportes hacia la izquierda muy fuertes entre las abscisas 0 y 49 disminuyendo en magnitud de derecha a izquierda, presentándose por esto una acresión generalizada y excesiva en dicho sector. Se presenta una distorsión de la modelación entre las abscisas 87 y 100. Esta modelación nos da una idea de lo que ocurre en cuanto a transporte de sedimentos en el periodo de tormentas de diciembre-abril. (Ver figura 48).

El oleaje NE de 9 segundos provoca transportes a la derecha entre las abscisas 0 y 8, disminuyendo de izquierda a derecha, generando acresión. En el tramo de la abscisa 35 a la 50 provoca transportes hacia la izquierda disminuyendo de derecha a izquierda generando acresión (Ver Figura No 49). A nivel general podemos concluir a la luz del análisis de oleaje previo y de estas tendencias de transporte que la dirección predominante inducida por el oleaje Noreste a los sedimentos es de derecha izquierda, es decir del sector de Santo domingo hacia Bocagrande.

Los oleajes N de 4 y 5 segundos generan un transporte litoral más bien bajo, presentándose por esto escasa variación en la línea de costa. (Figuras No 50 y 51).

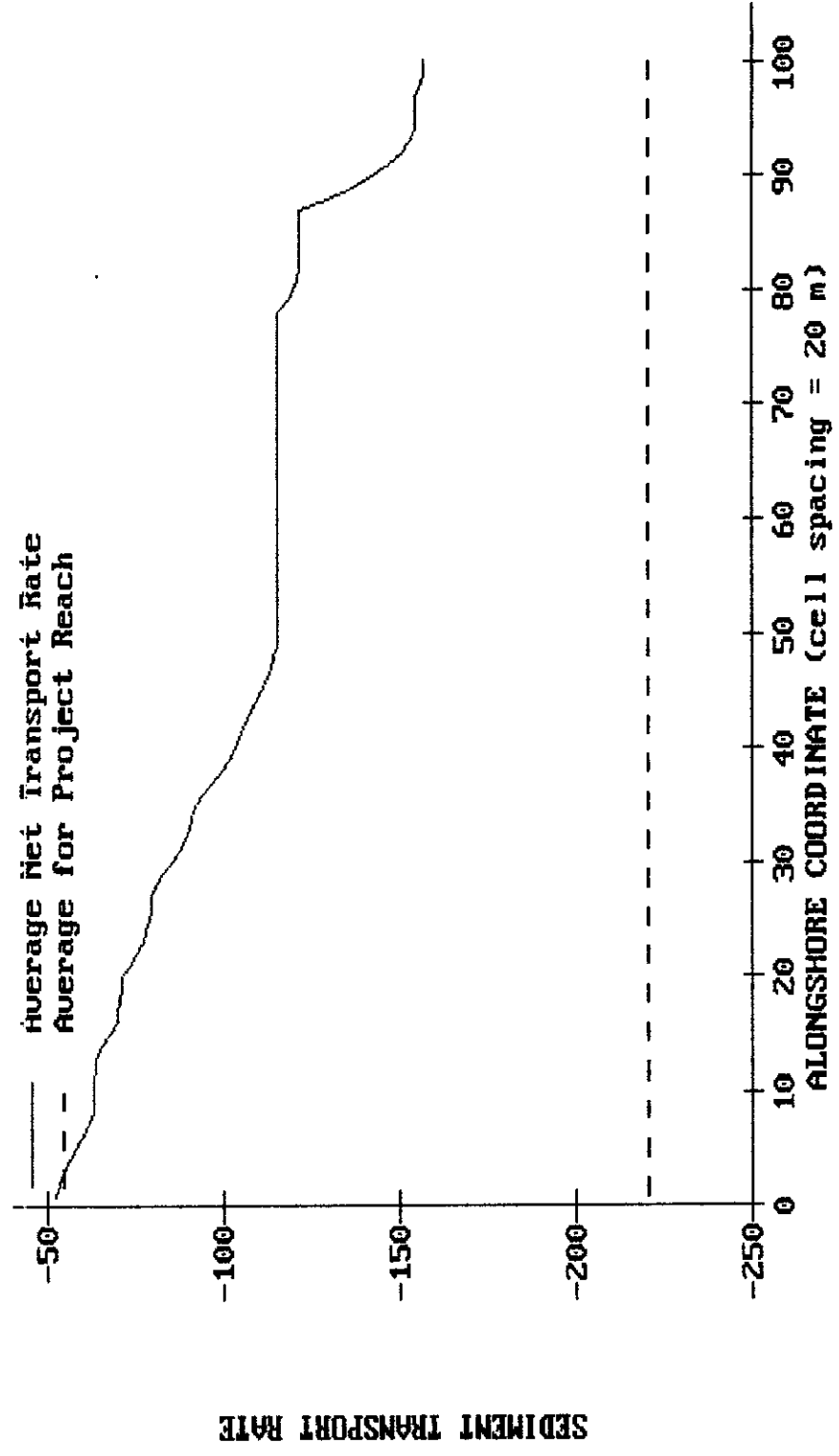
FIGURA No 48.1.1. MODELACION OLEAJE NORESTE T=8 SEG. 1.998-1.996
 VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

10A



125

FIGURA. No 48. 2. MODELACION OLEAJE NE 1988-1996 T=8s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.



Nota: Unidades en metros cúbicos.

186

FIGURA No 49.1.MODELACION OLEAJE NORESTE T=9 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

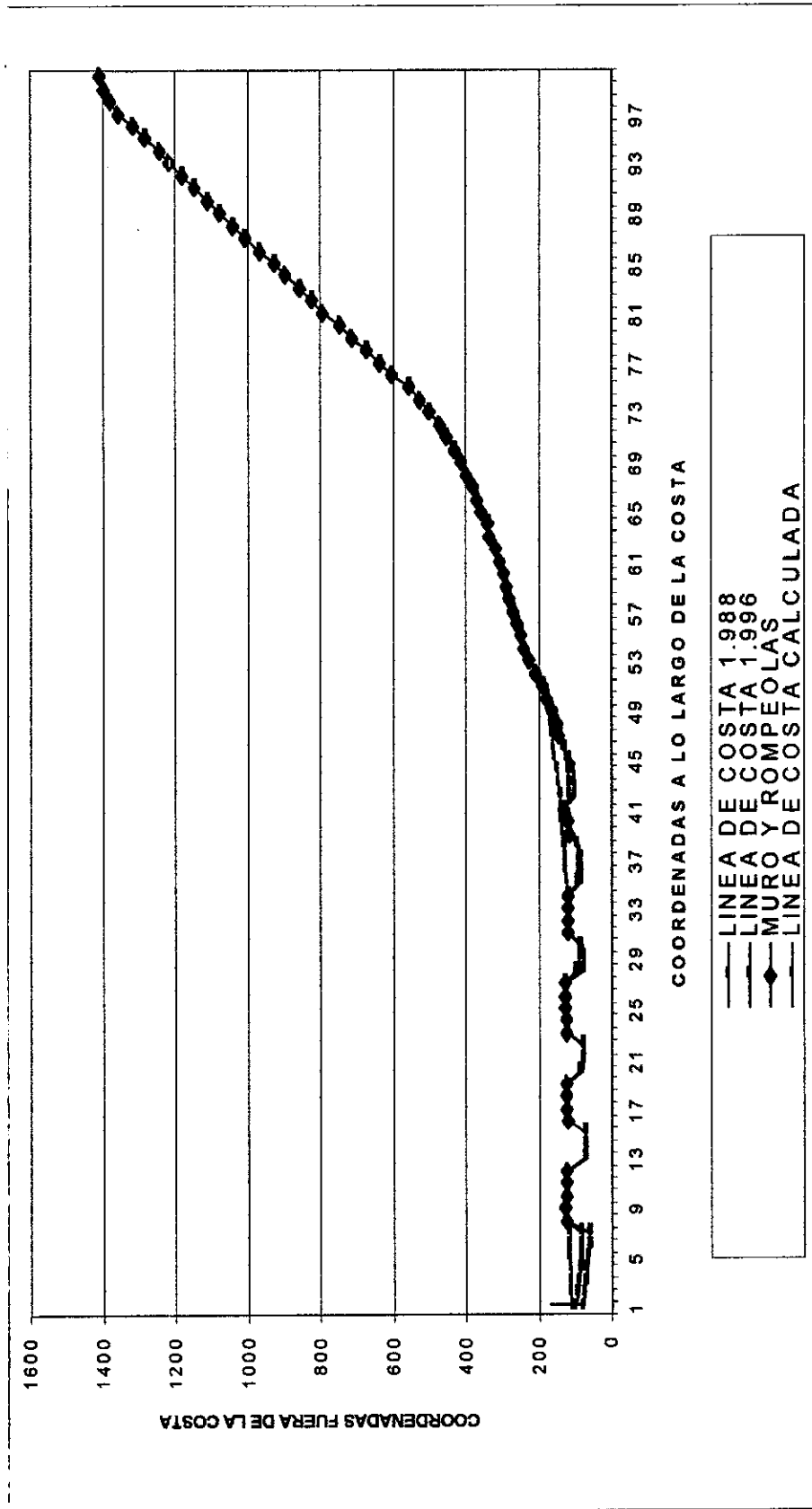
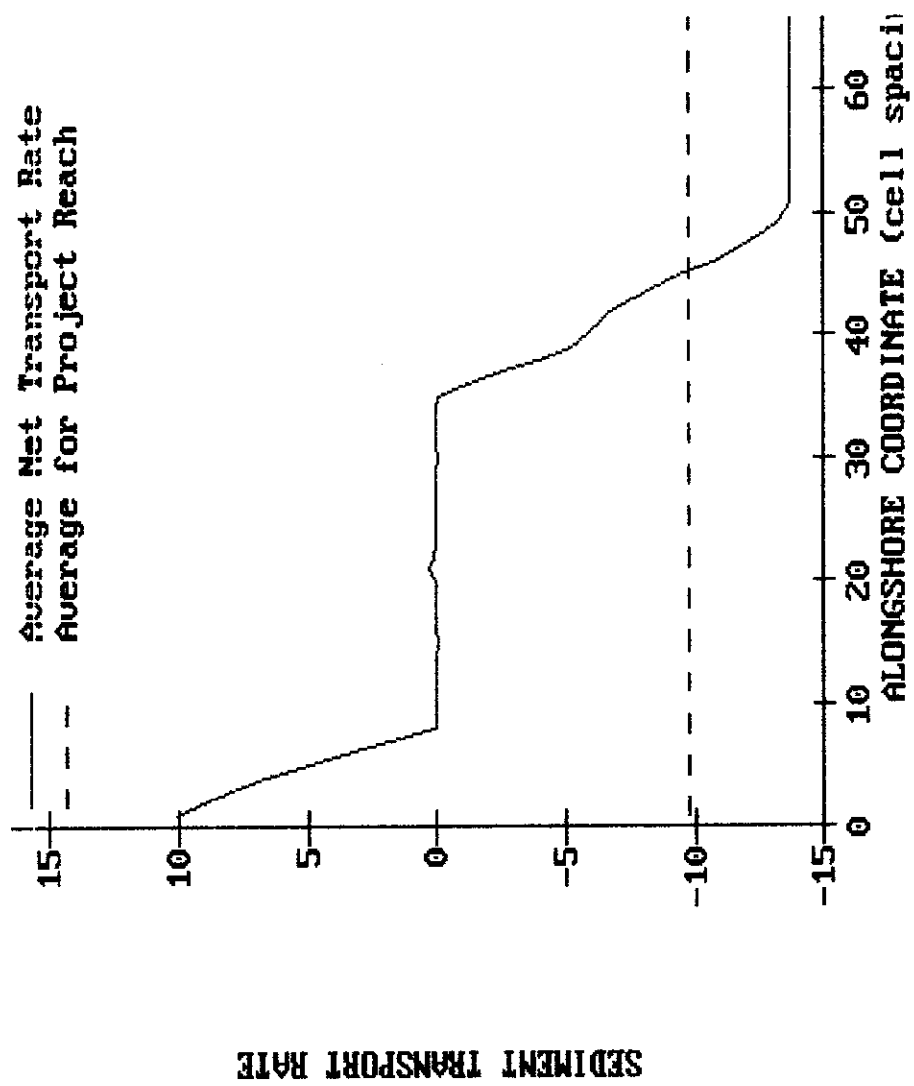


FIGURA. No 49.2. MODELACION OLEAJE NE 198
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS



Nota: Unidades en metros cubicos.

188

FIGURA No 50 .1. MODELACION OLEAJE NORTE T=4 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

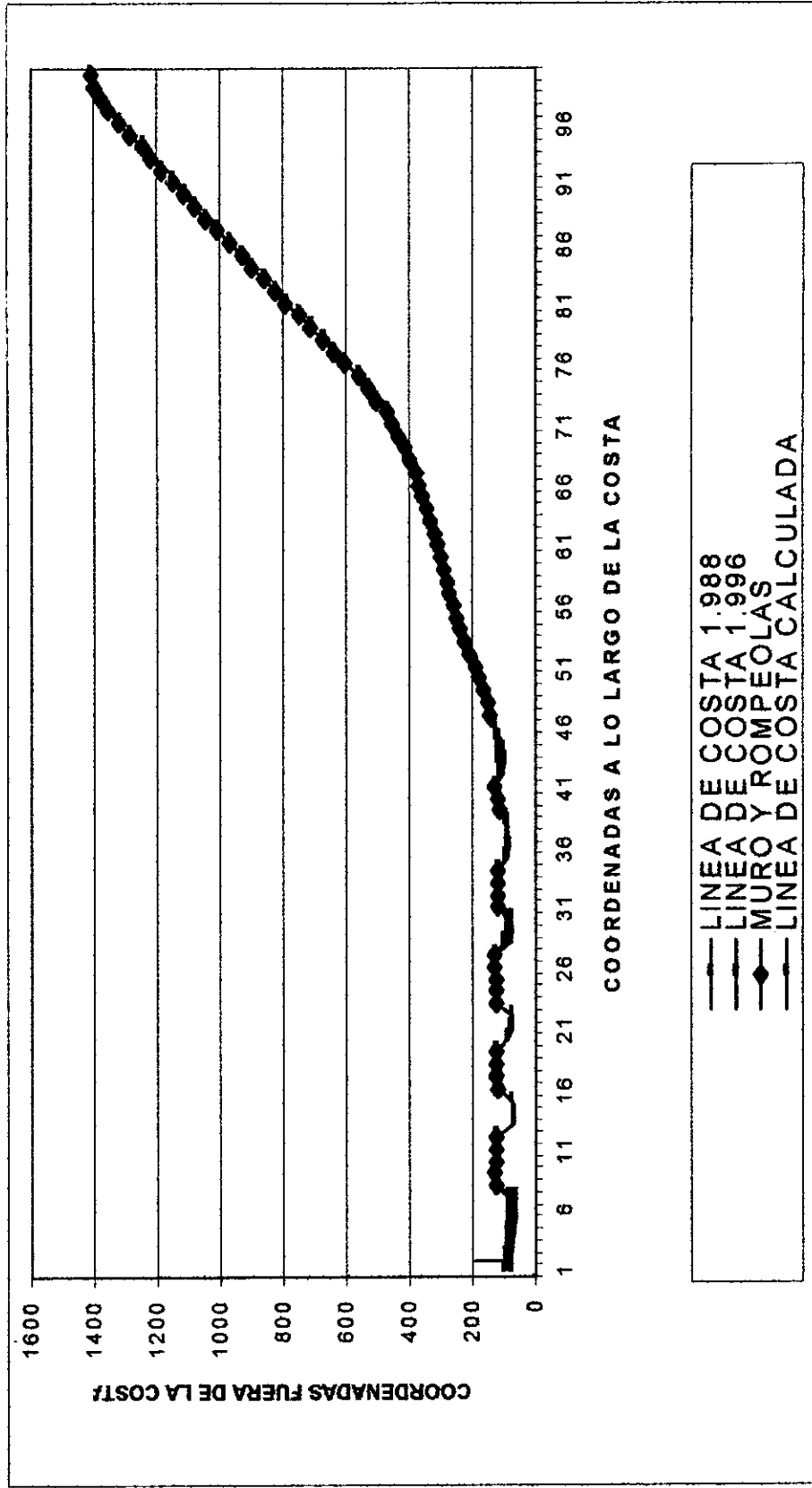
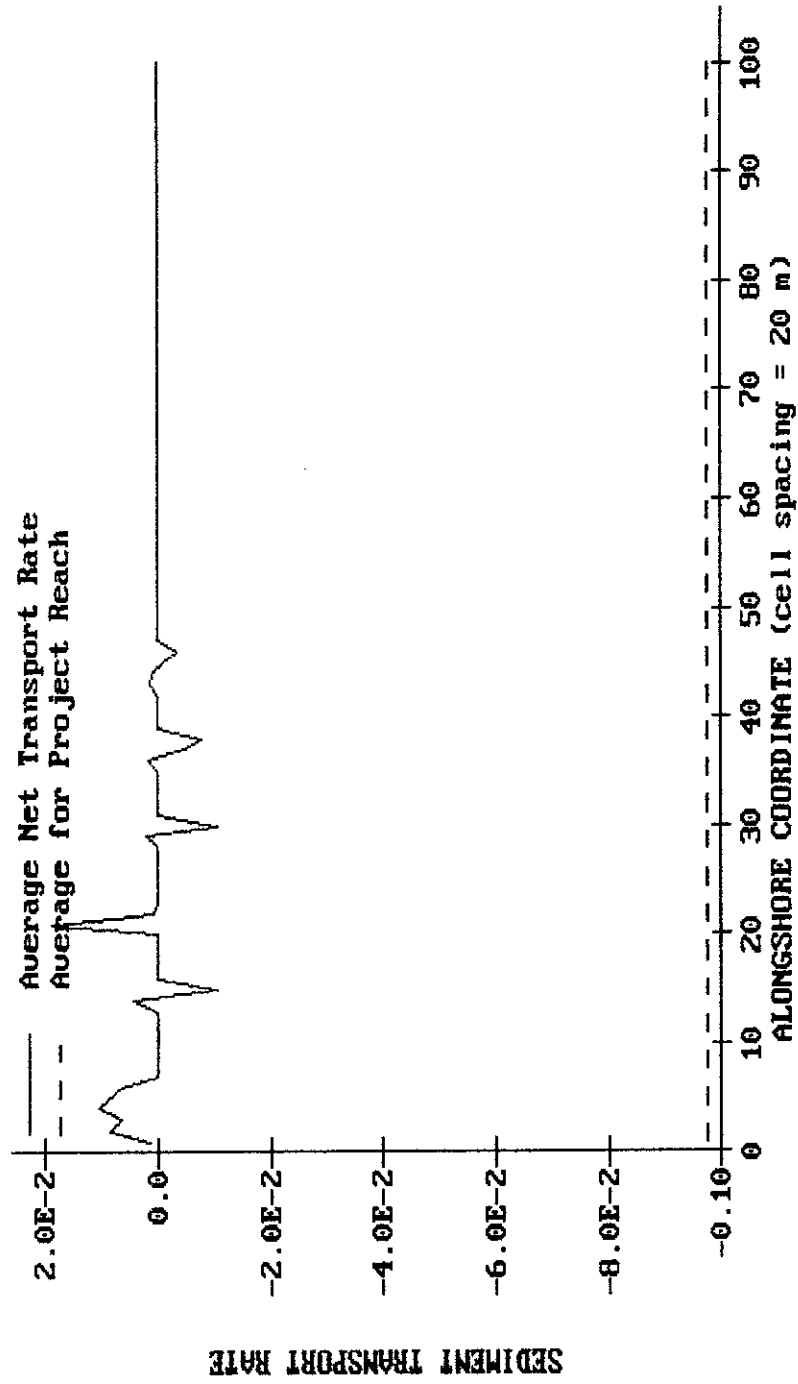


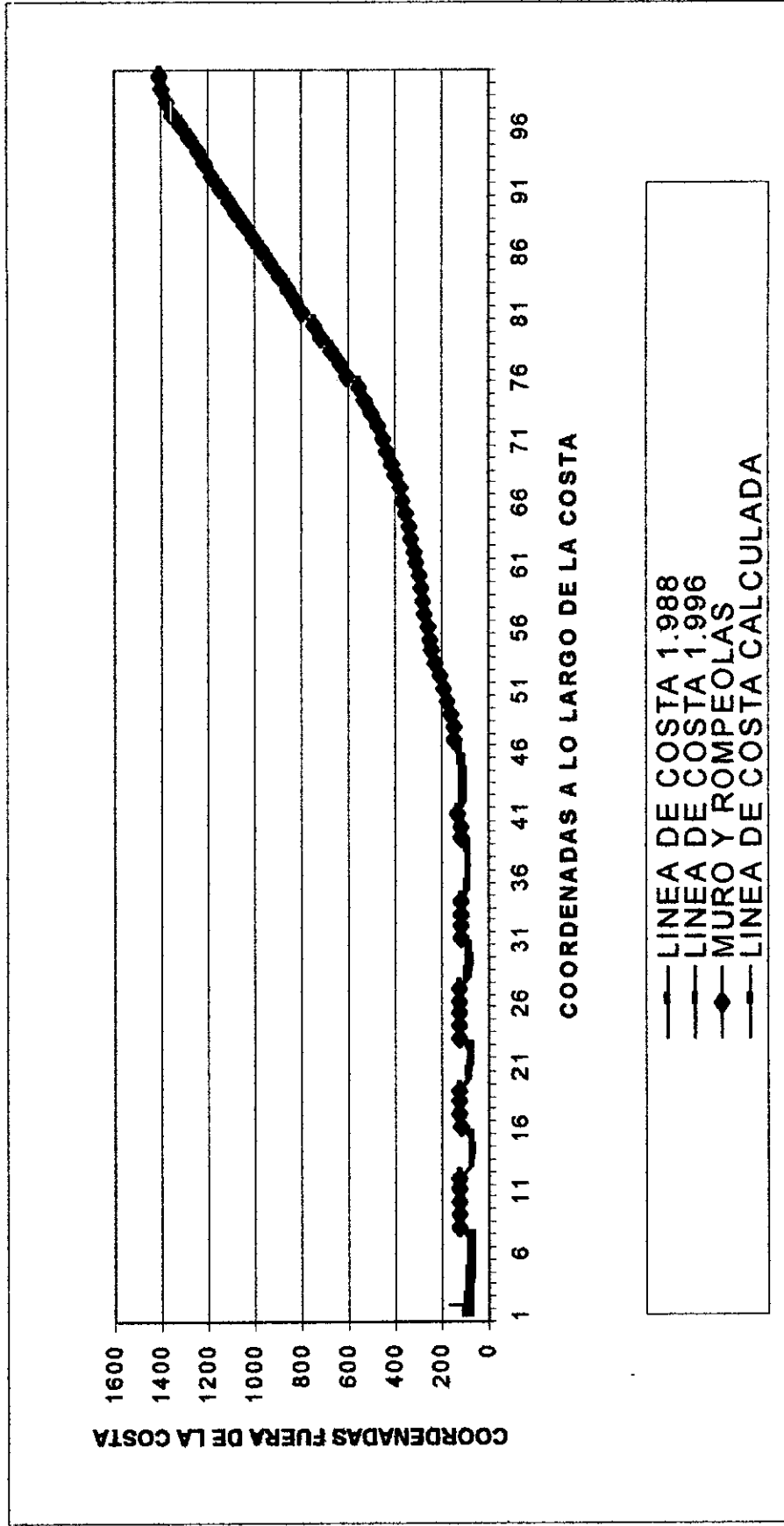
FIGURA. No 50.2. MODELACION OLEAJE N 1988-1996 T=4s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.



Nota: Unidades en metros cúbicos.

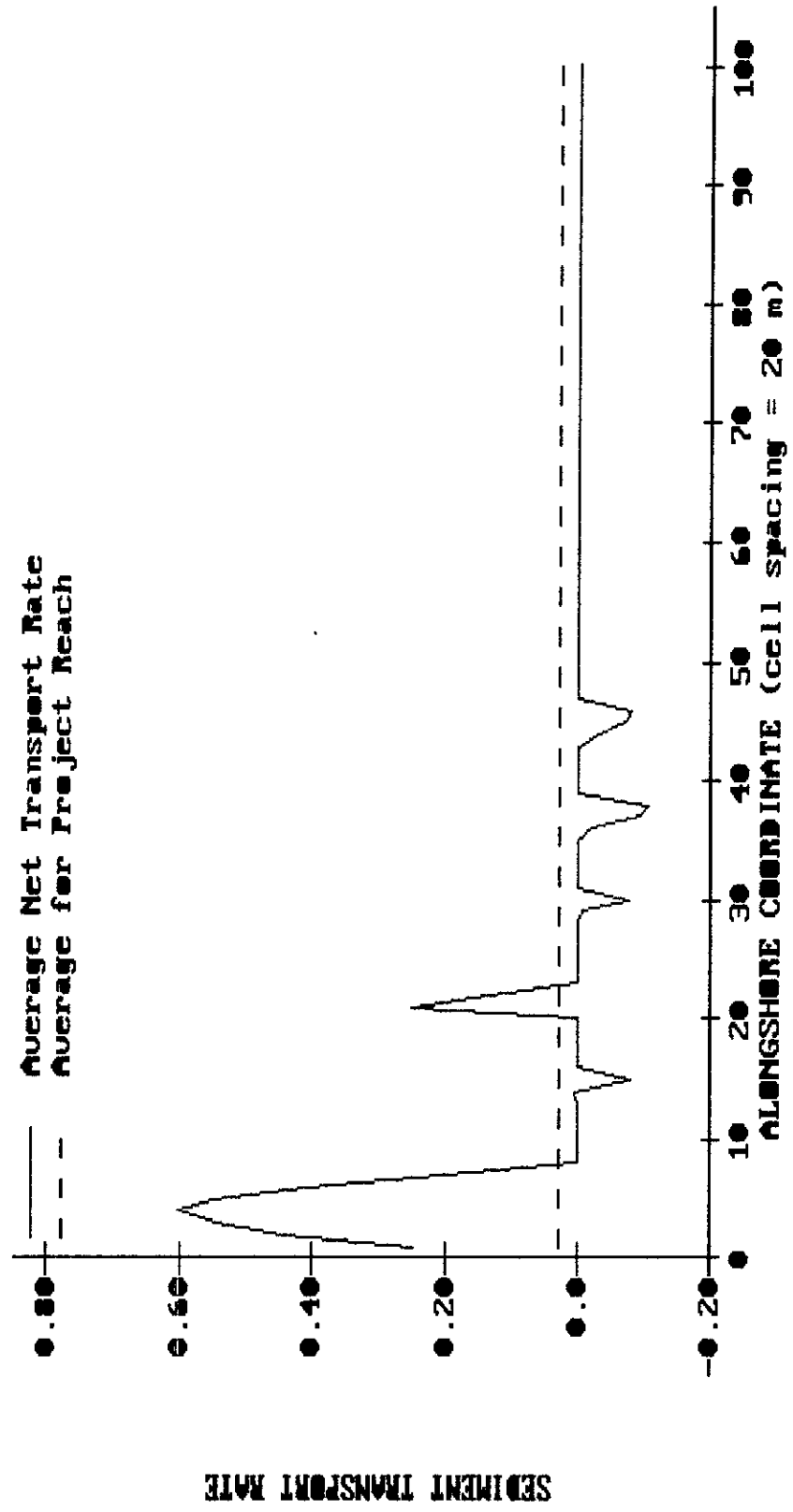
190.

FIGURA No 51.1.1. MODELACION OLEAJE NORTE T=5 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.



191

FIGURA. No 51.2. MODELACION OLEAJE N 1988-1996 T=5s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.



Nota: Unidades en metros cúbicos.

Los oleajes N de 6, 7 y 8 segundos generan transportes hacia la derecha entre las abscisas 0 y 7, disminuyendo de izquierda a derecha generándose acresión. Se presentan transportes hacia la izquierda entre las celdas 42 y 49 disminuyendo en magnitud de derecha a izquierda generándose acresión. Hay poca variabilidad en el valor de los transportes del resto de los sectores, presentándose estabilidad en ellos. Con respecto al oleaje Norte podemos concluir a la luz del análisis de oleaje previo y de estas tendencias de transporte calculadas por el modelo que la dirección de transporte de sedimentos inducida por él es semejante a la del oleaje Noreste. (Ver Figuras No 52, 53 y 54).

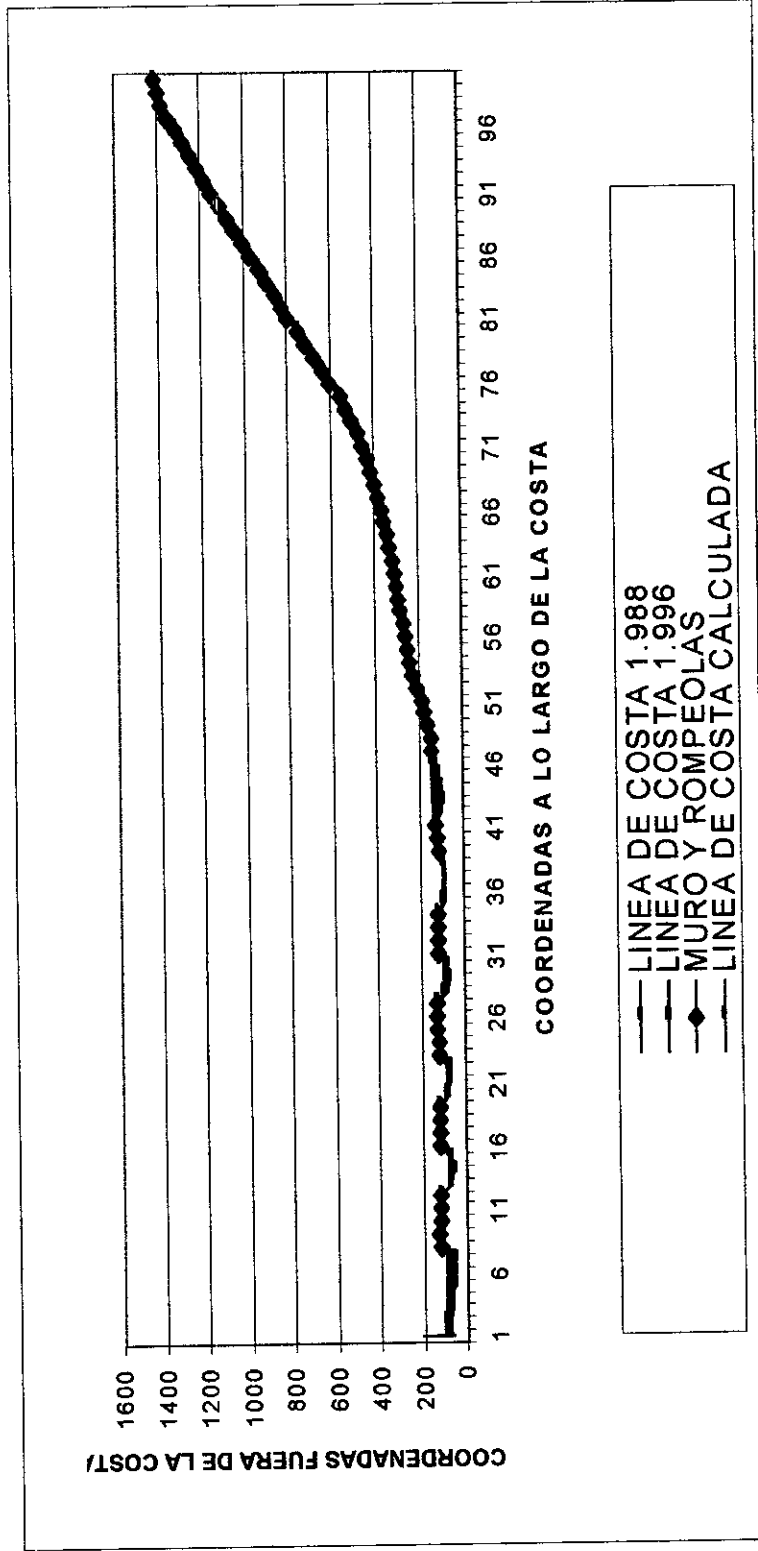
Los oleajes NW generan transportes hacia la derecha, con tendencia a decaer en magnitud en los sectores derechos de las playas y a ser mayores en los sectores izquierdos, generándose por esto acresión en los sectores derechos y desplazamiento de sedimento en los sectores izquierdos.

Lo anterior hace que la línea de costa en los tramos intermedios de las estructuras tienda a hacerse paralela al oleaje que las incide. Esto se hace notar menos en el oleaje de 4 segundos que genera transportes con menos variabilidad provocando una gran estabilidad en la línea de costa. (Ver Figuras No 55, 56, 57 y 58).

Los oleajes W generan efectos semejantes a los NW, presentándose especial afectación por erosión en ciertos sectores en el caso del oleaje de 6 segundos. (Ver Figuras No 59, 60, 61, 62).

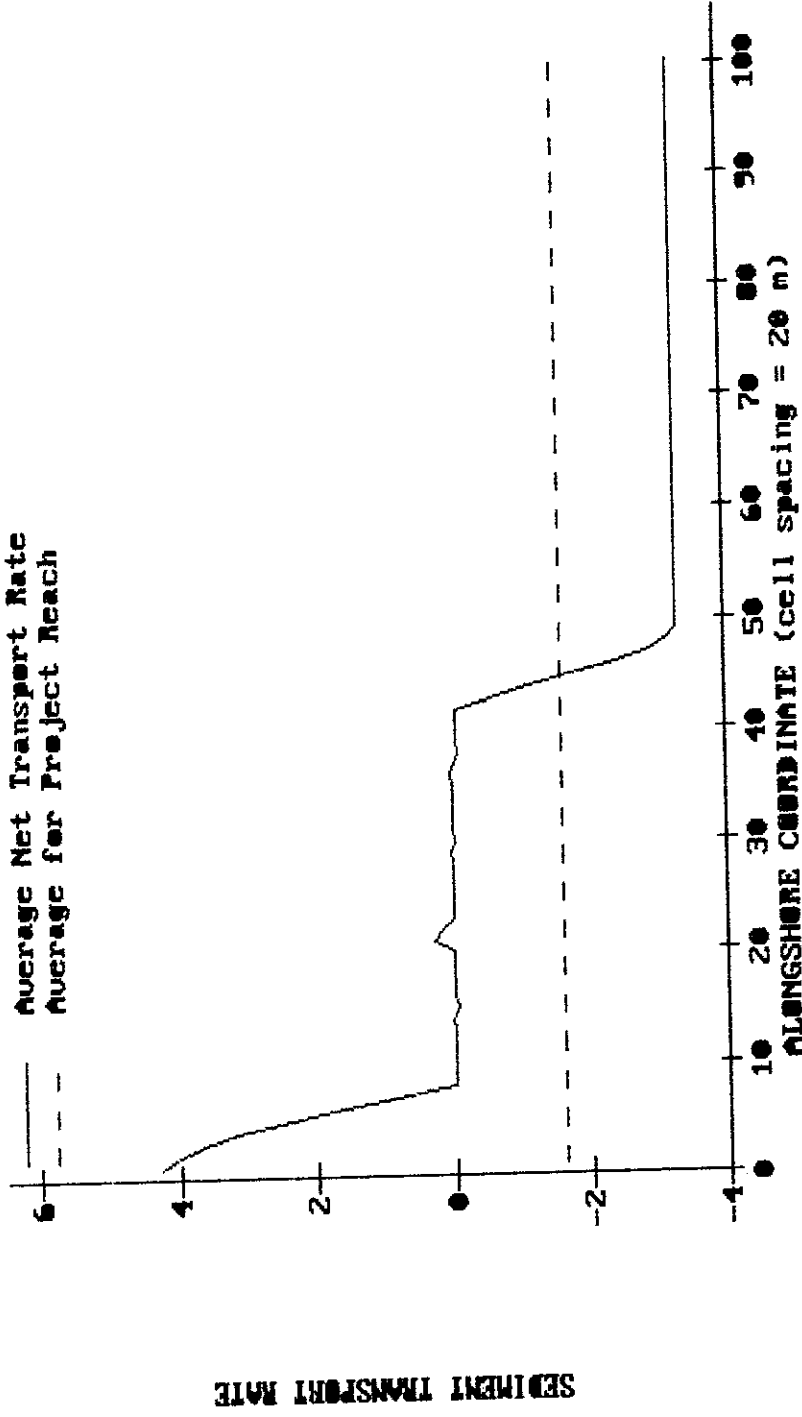
193.

FIGURA No 52.1. MODELACION OLEAJE NORTE T=6 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.



194.

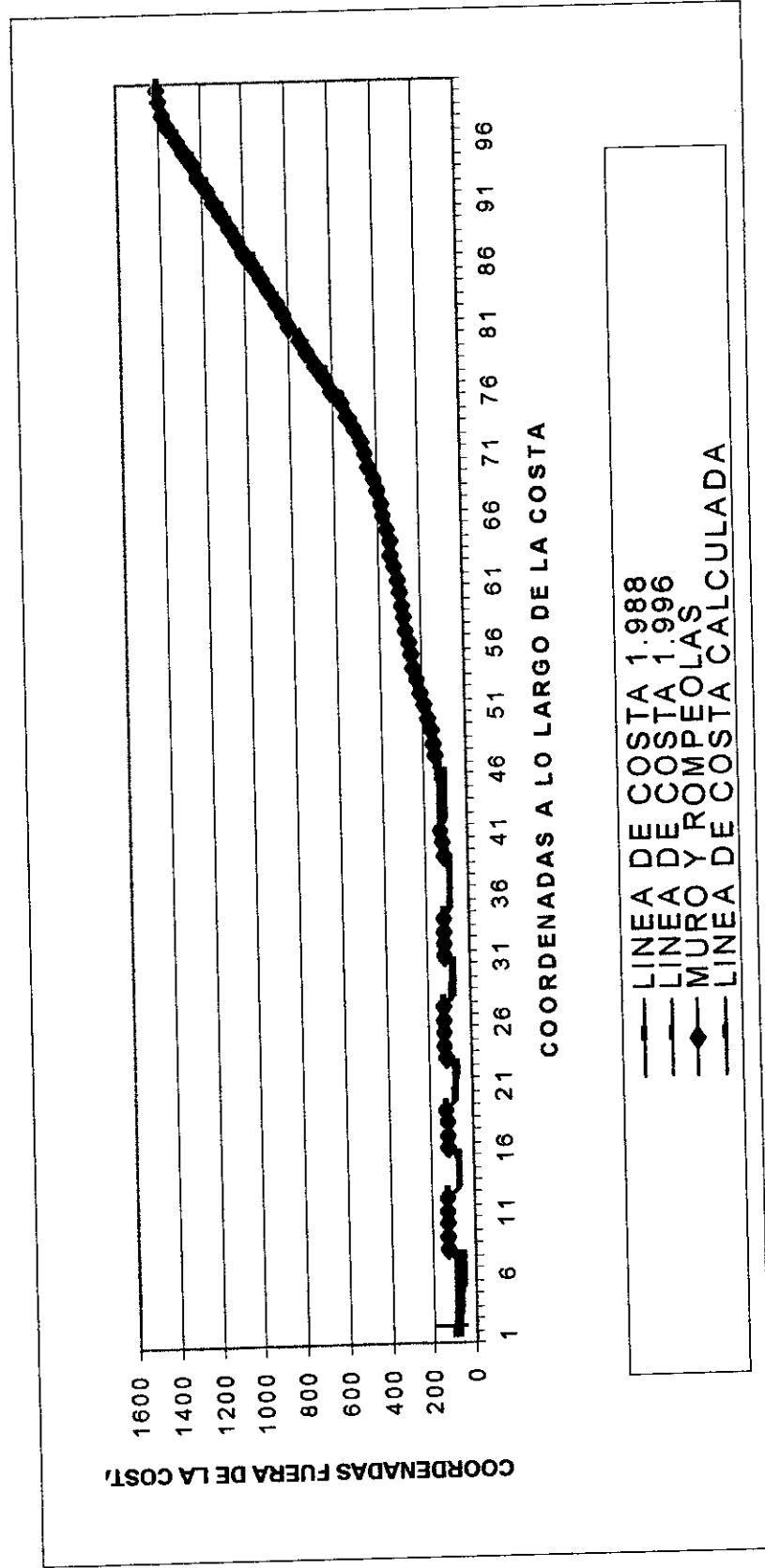
FIGURA. No 52.2. MODELACION OLEAJE N 1988-1996 T=6s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.



Nota: Unidades en metros cubicos.

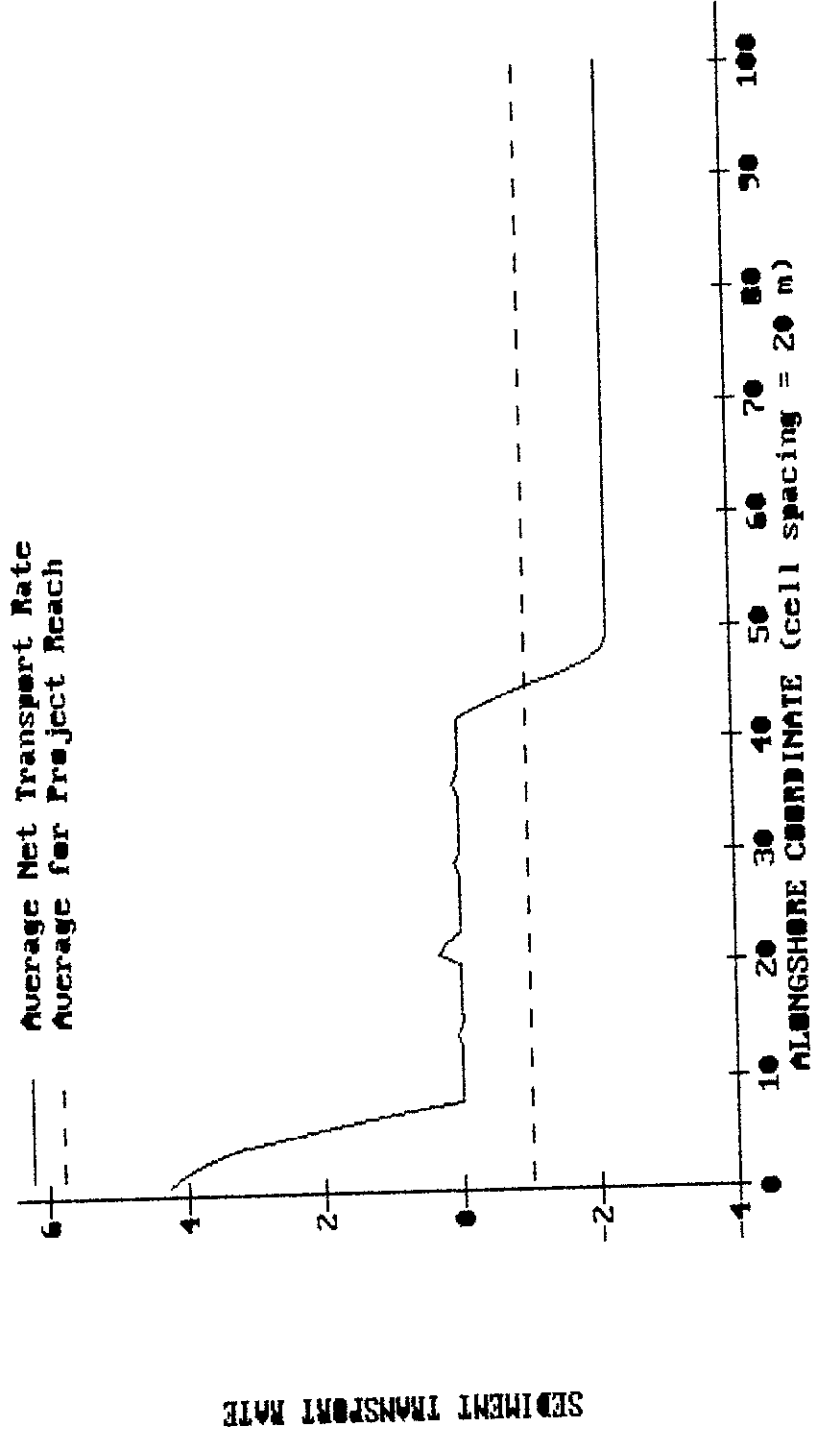
195

FIGURA No 53.1.1.MODELACION OLEAJE NORTE T=7 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.



196.

FIGURA. No 53.2. MODELACION OLEAJE N 1988-1996 T=7s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .



Nota: Unidades en metros cúbicos.

197.

FIGURA No 54.1.1.MODELACION OLEAJE NORTE T=8 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

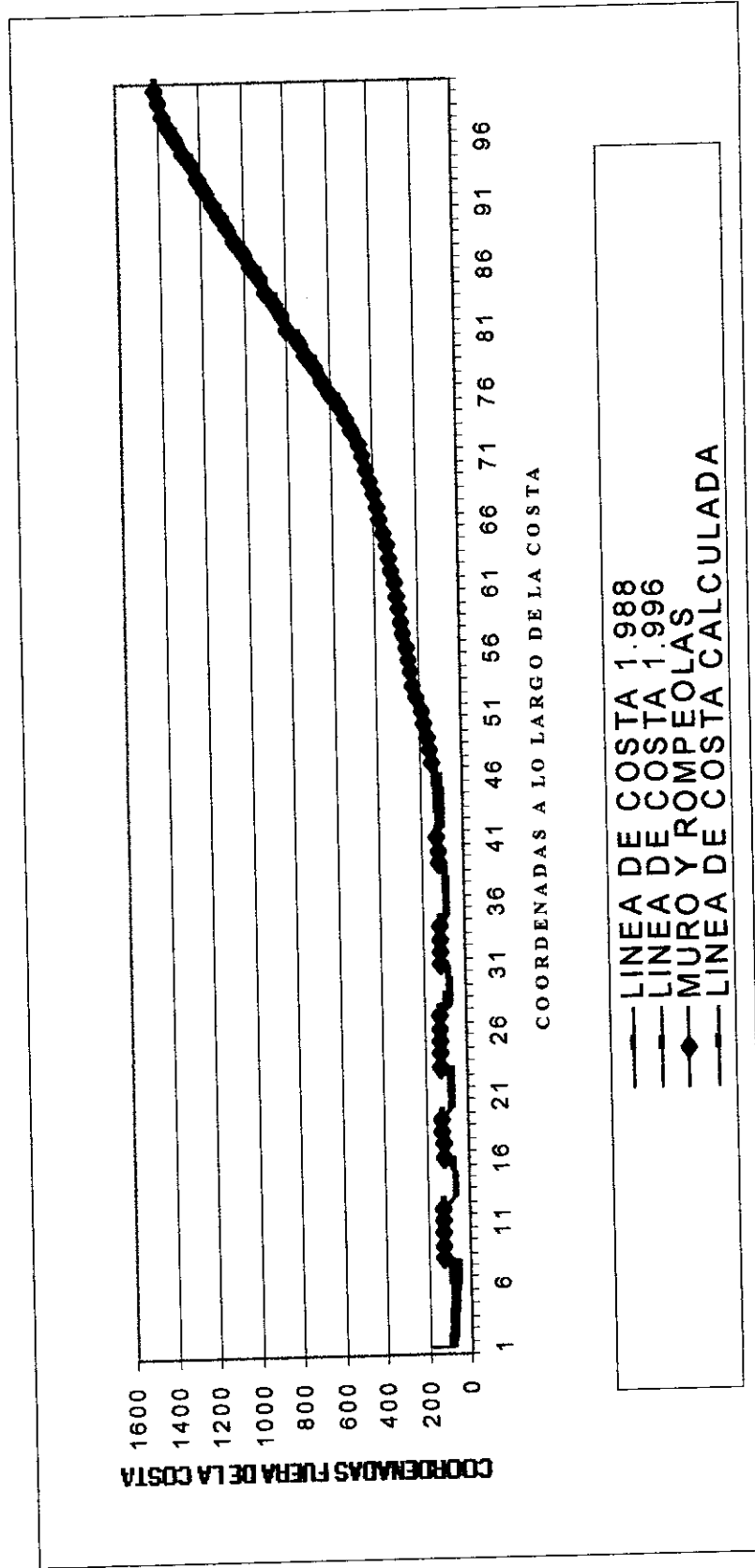
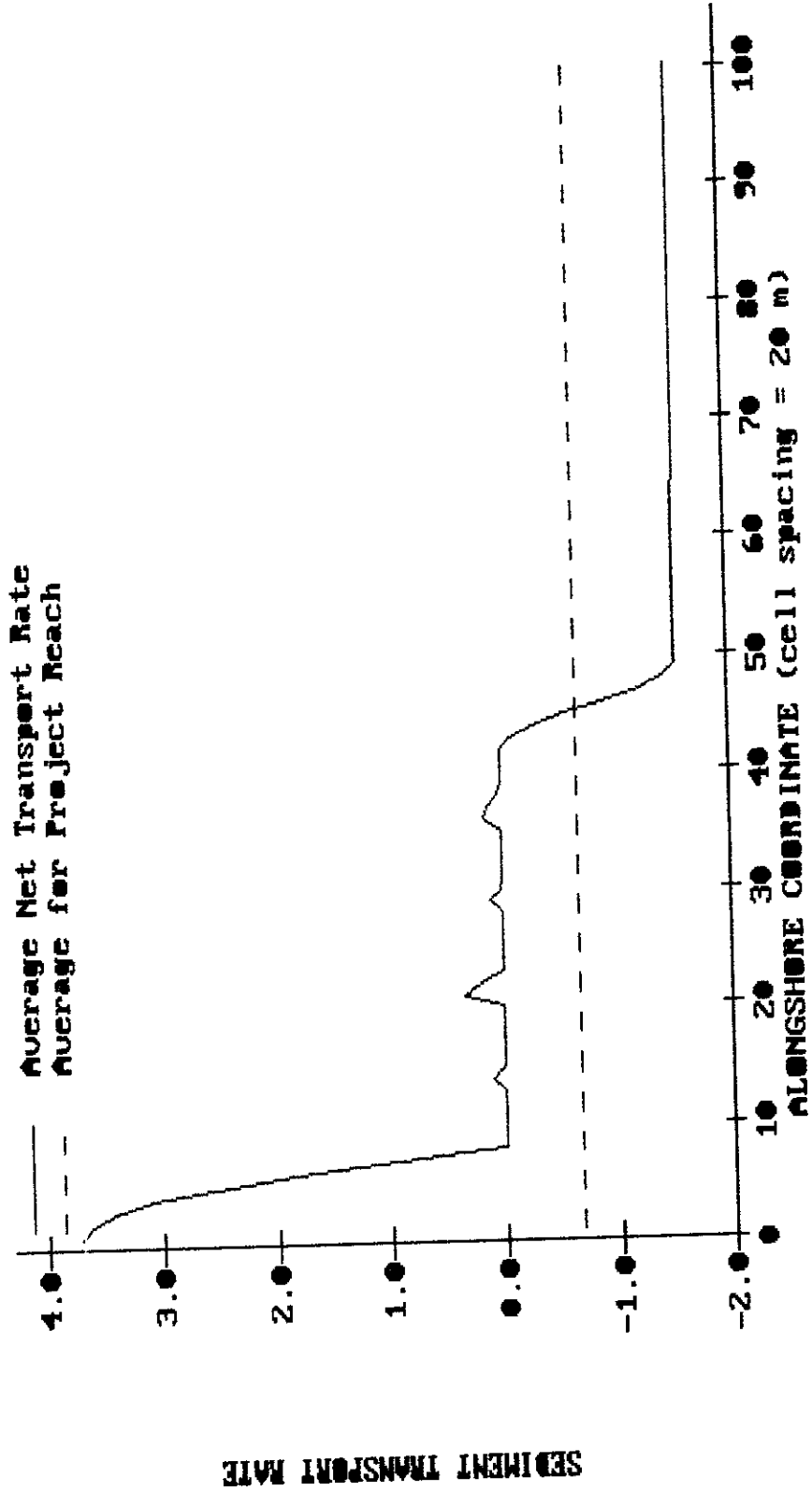


FIGURA. No 54.2.. MODELACION OLEAJE N 1988-1996 T=8s
 TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

197.



Nota: Unidades en metros cúbicos.

199.

FIGURA No 55.1. MODELACION OLEAJE NOROESTE T=4 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

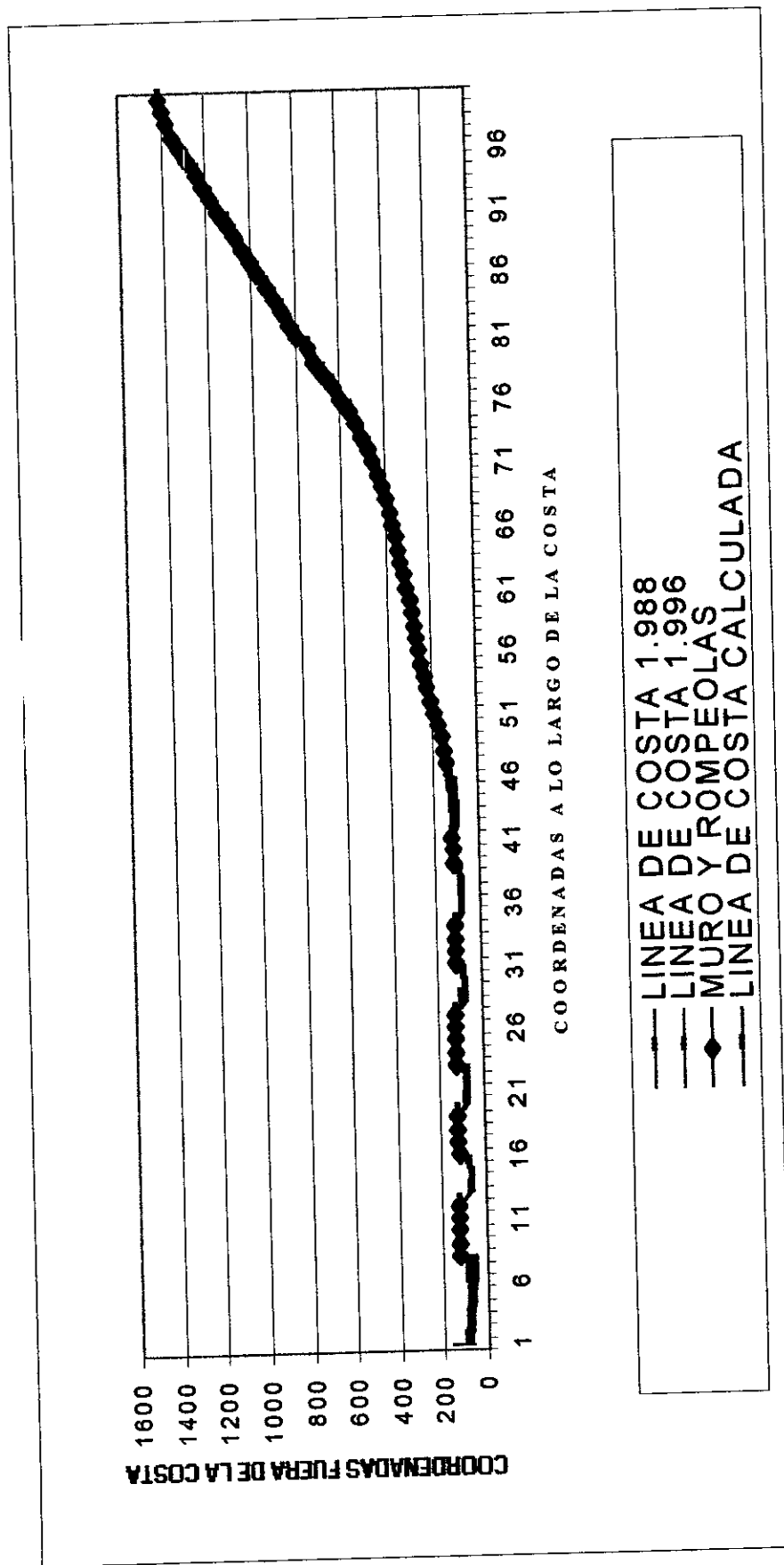
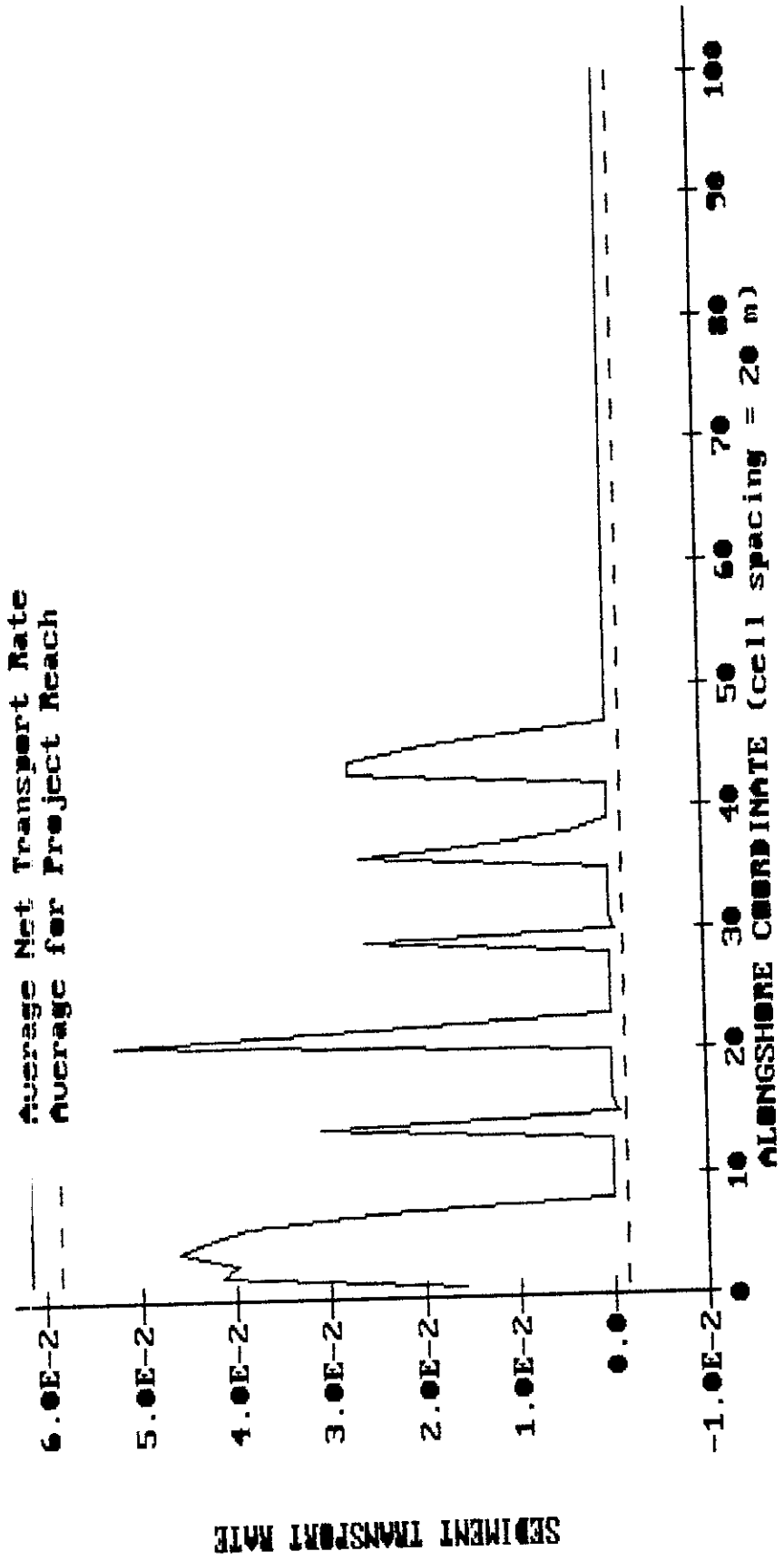


FIGURA. N° 55.2.. MODELACION OLEAJE NW 1988-1996 T=4s
 TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .

200.



Nota: Unidades en metros cúbicos.

FIGURA No 56.1. MODELACION OLEAJE NOROESTE T=5 SEG. 1.998-1.996
 VARIACION EN LA LINEA DE COSTA. 20/.

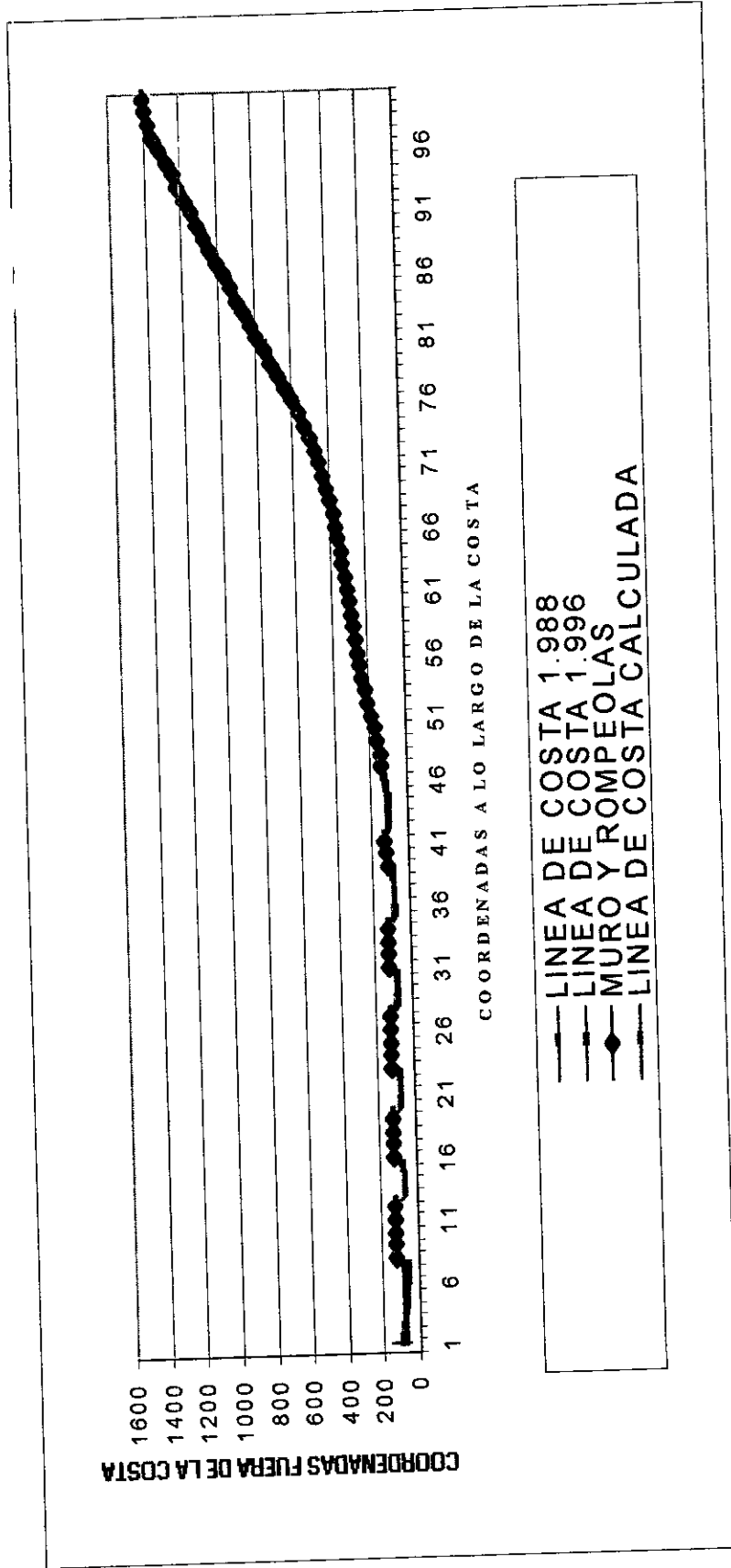
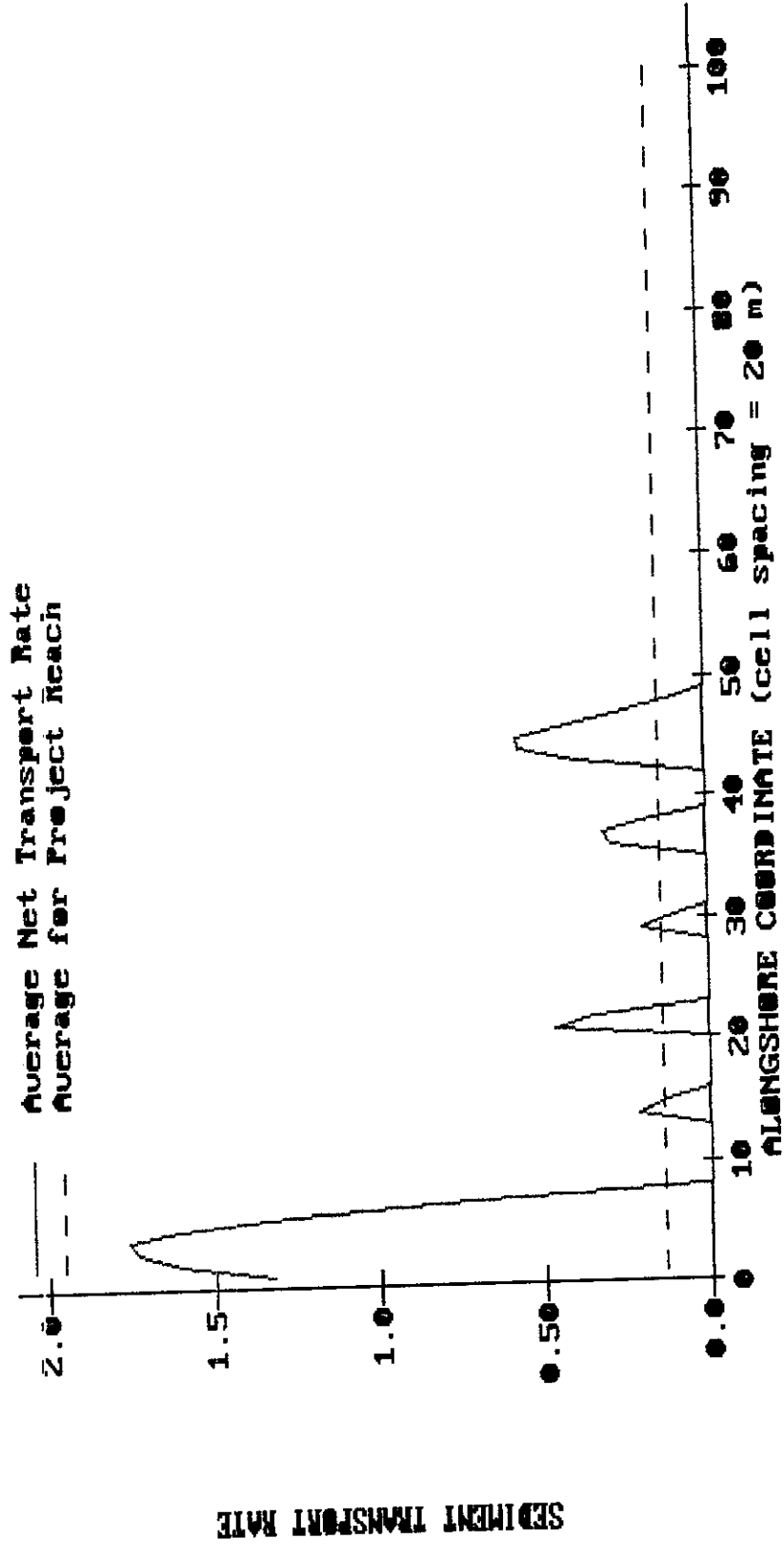


FIGURA. No 56.2. MODELACION OLEAJE NW 1988-1996 T=5s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .



Nota: Unidades en metros cubicos.

203

FIGURA No 57.1.1.MODELACION OLEAJE NOROESTE T=6 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

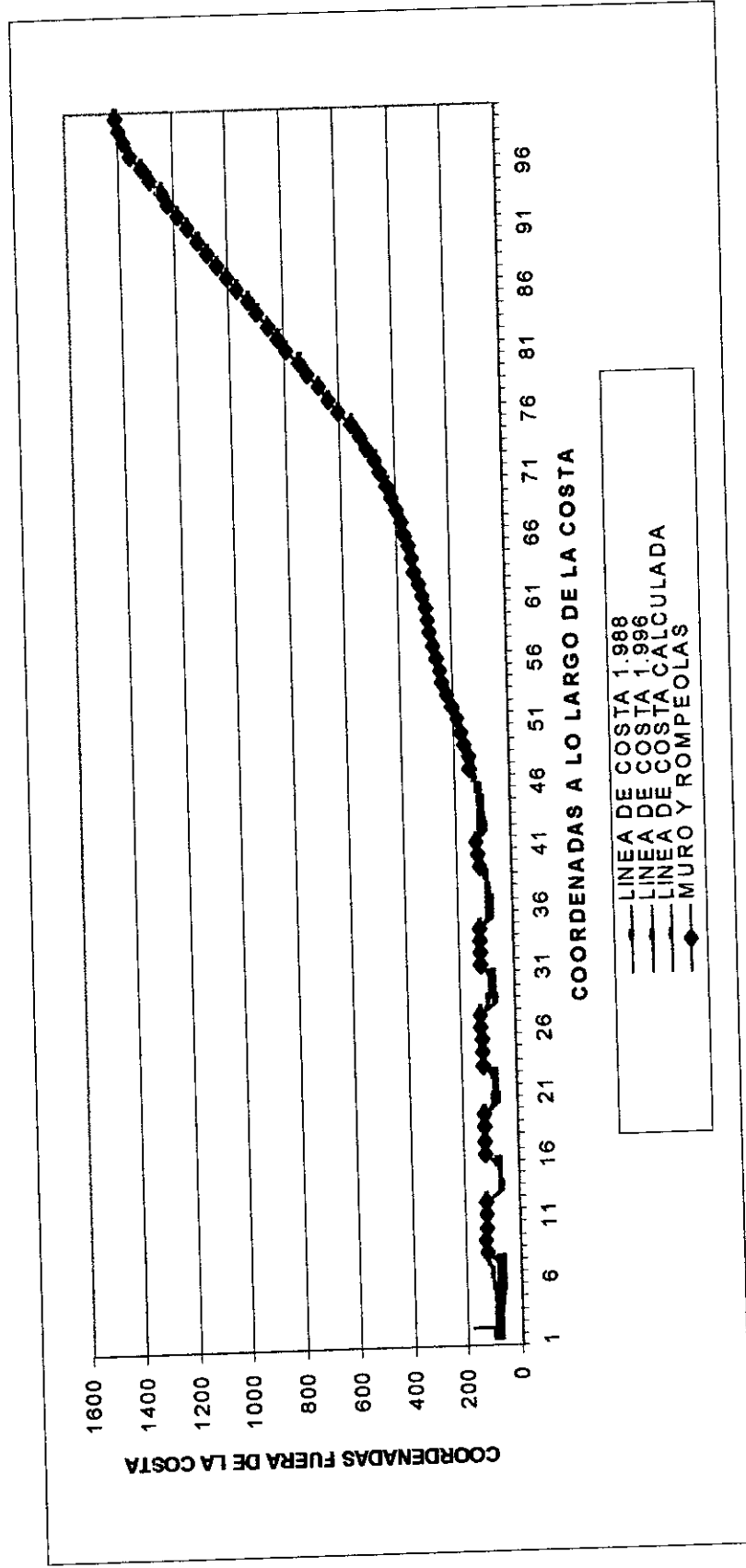
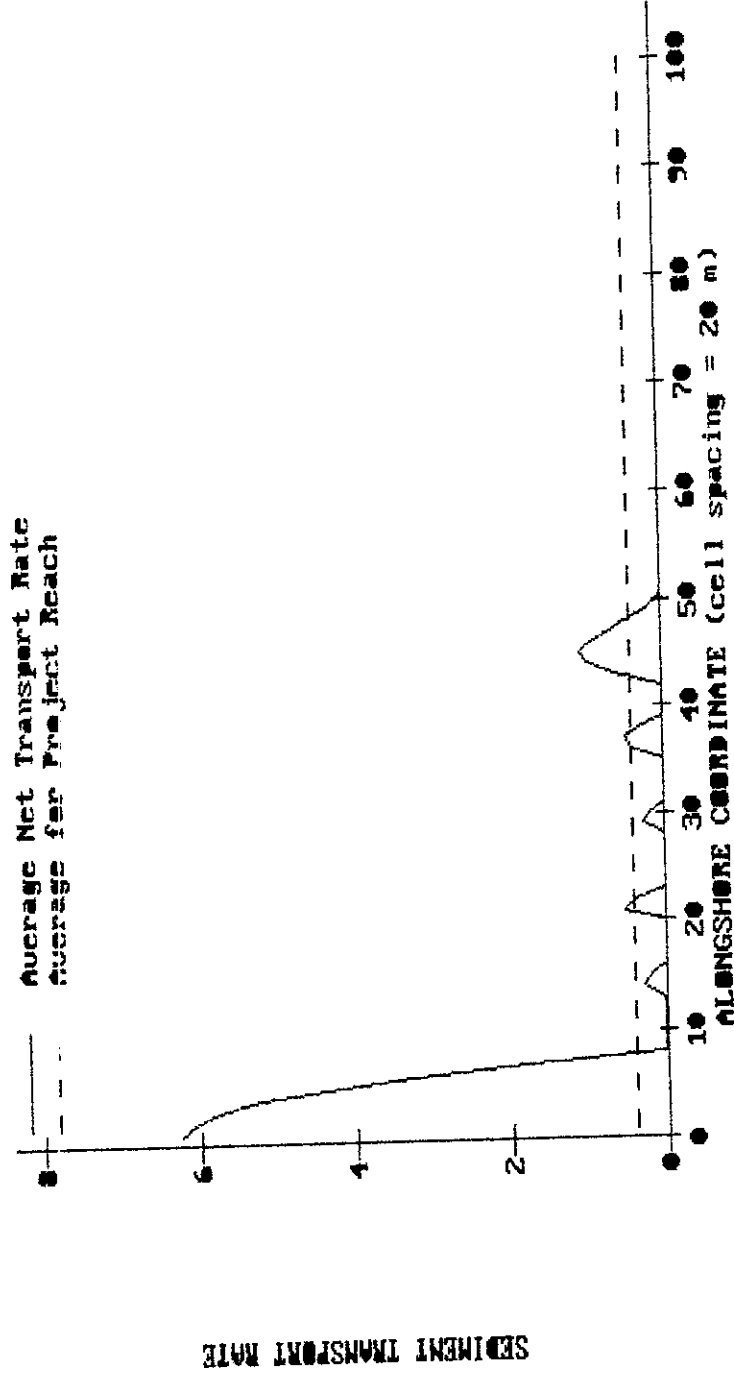


Fig No 57.2. MODELACION OLEAJE NW 1988-1996 T=6s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .



Nota: Unidades en metros cúbicos.

FIGURA No 58.1.MODELACION OLEAJE NOROESTE T=7 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

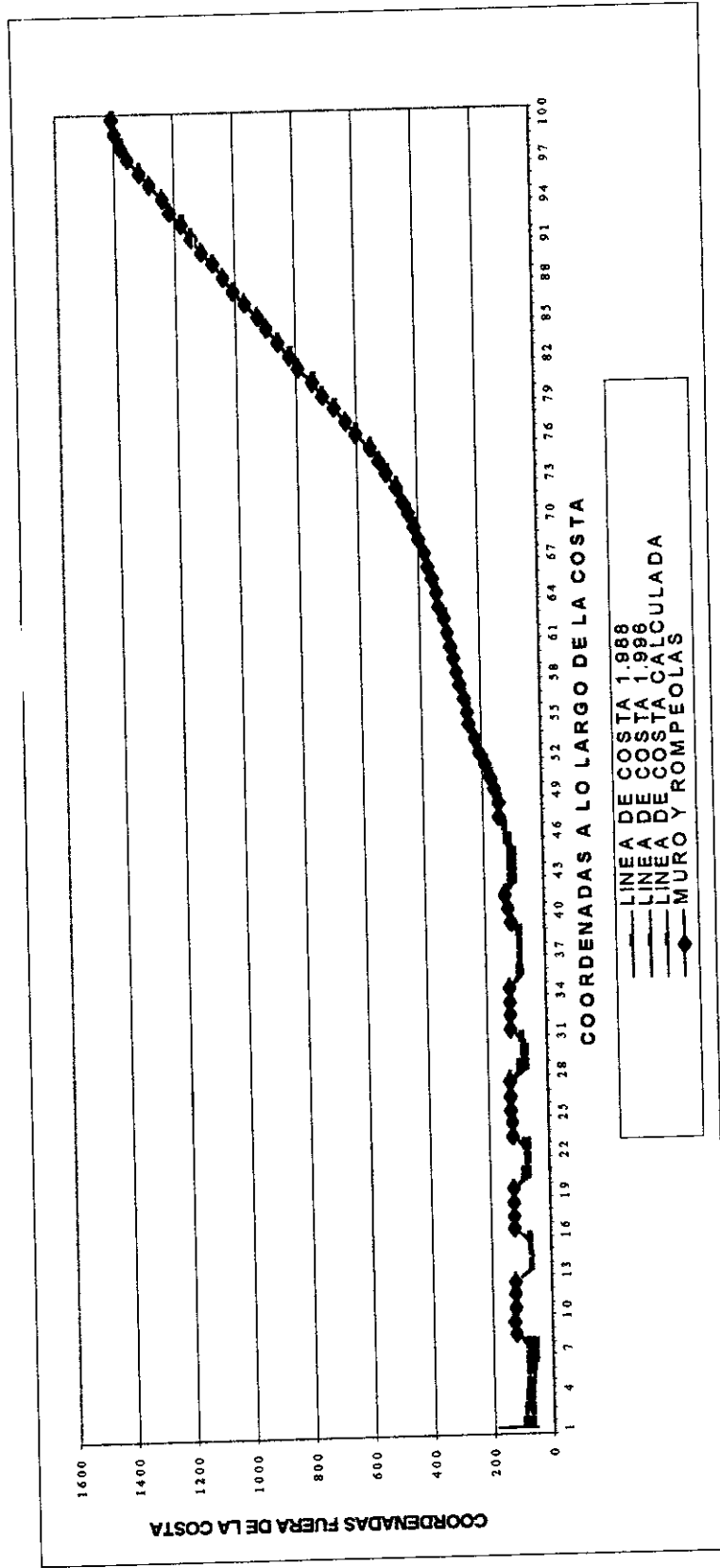
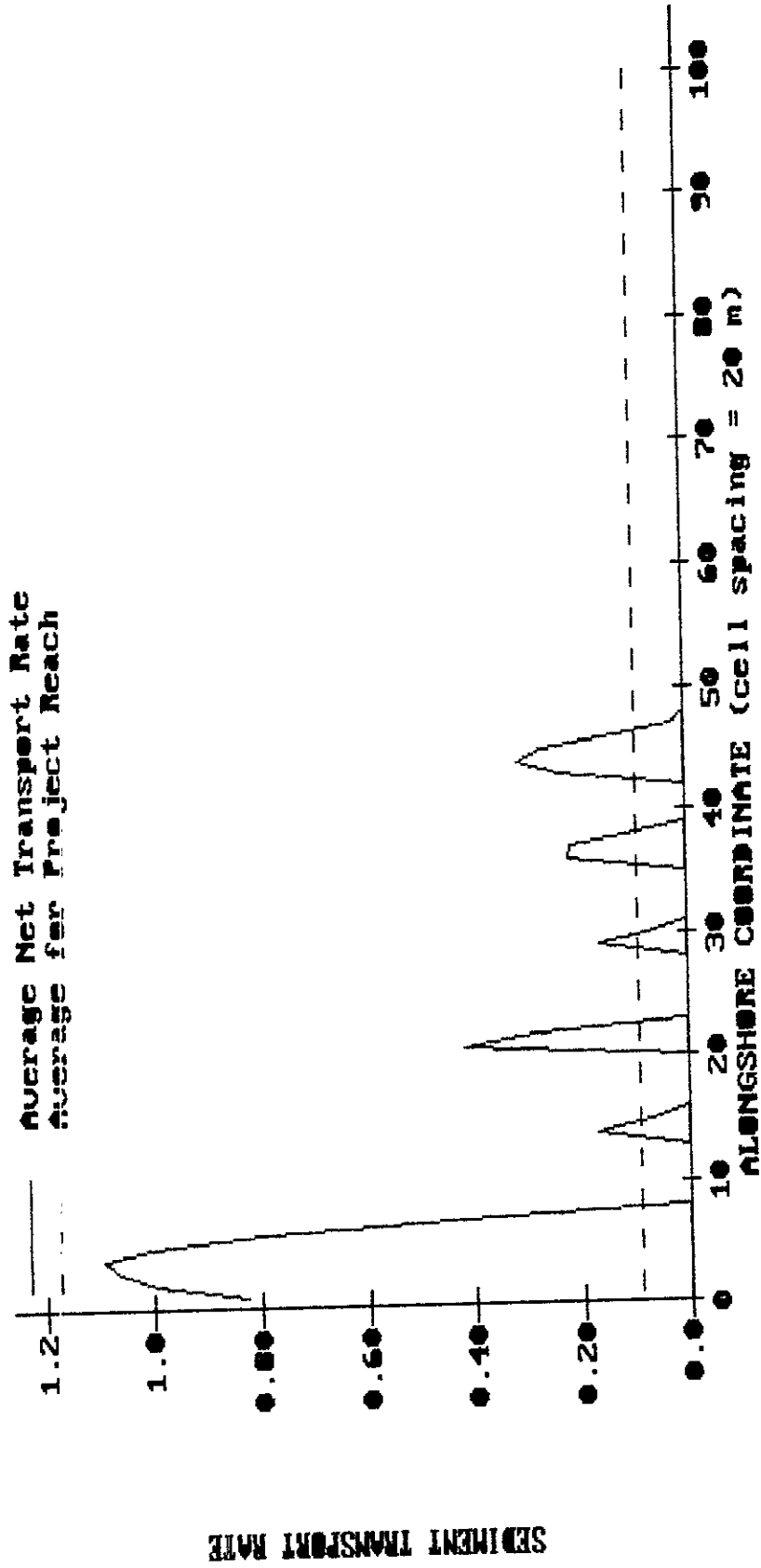


Fig No 58.2. MODELACION OLEAJE NW 1988-1996 T=7s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .



Nota: Unidades en metros cubicos.

207.

FIGURA No 59.1.1.MODELACION OLEAJE OESTE T=4 SEG. 1.998-1.996.
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

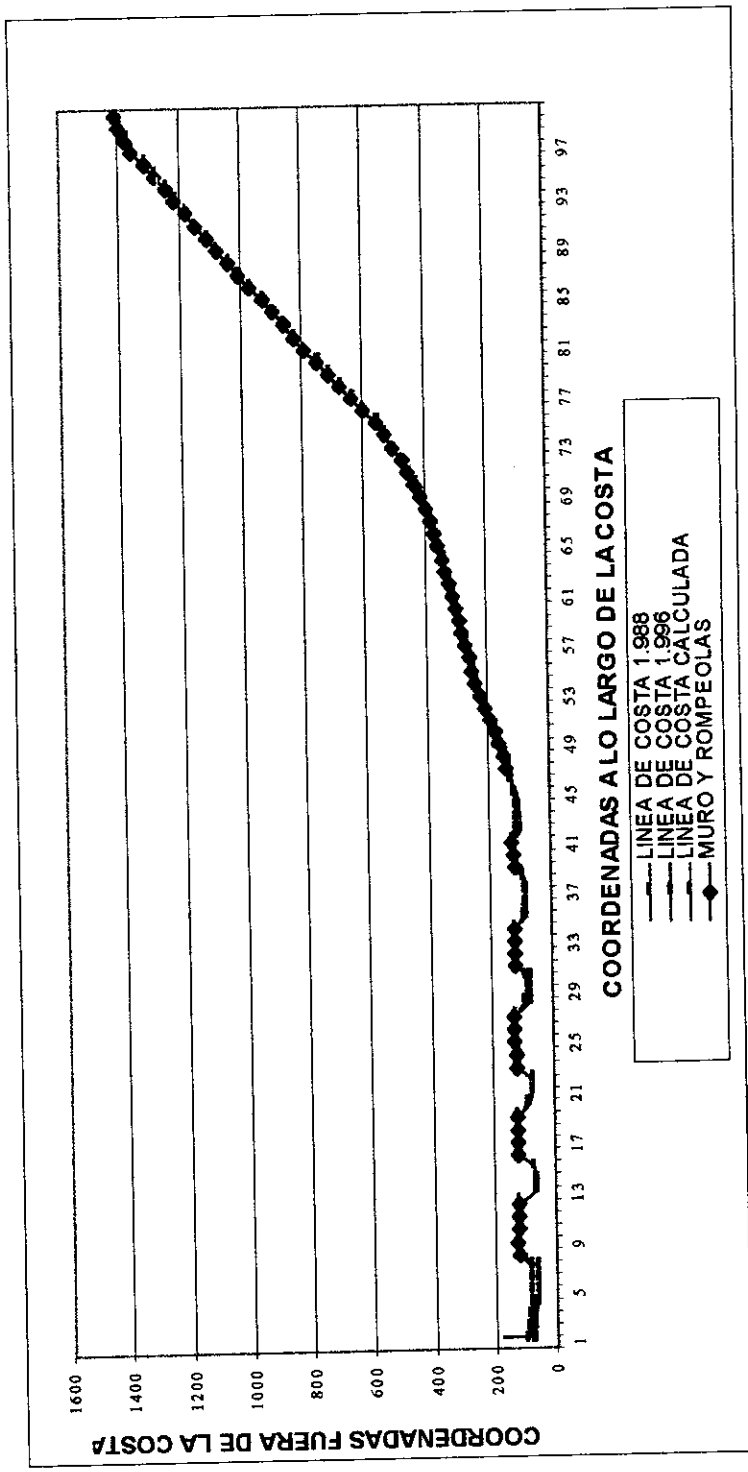
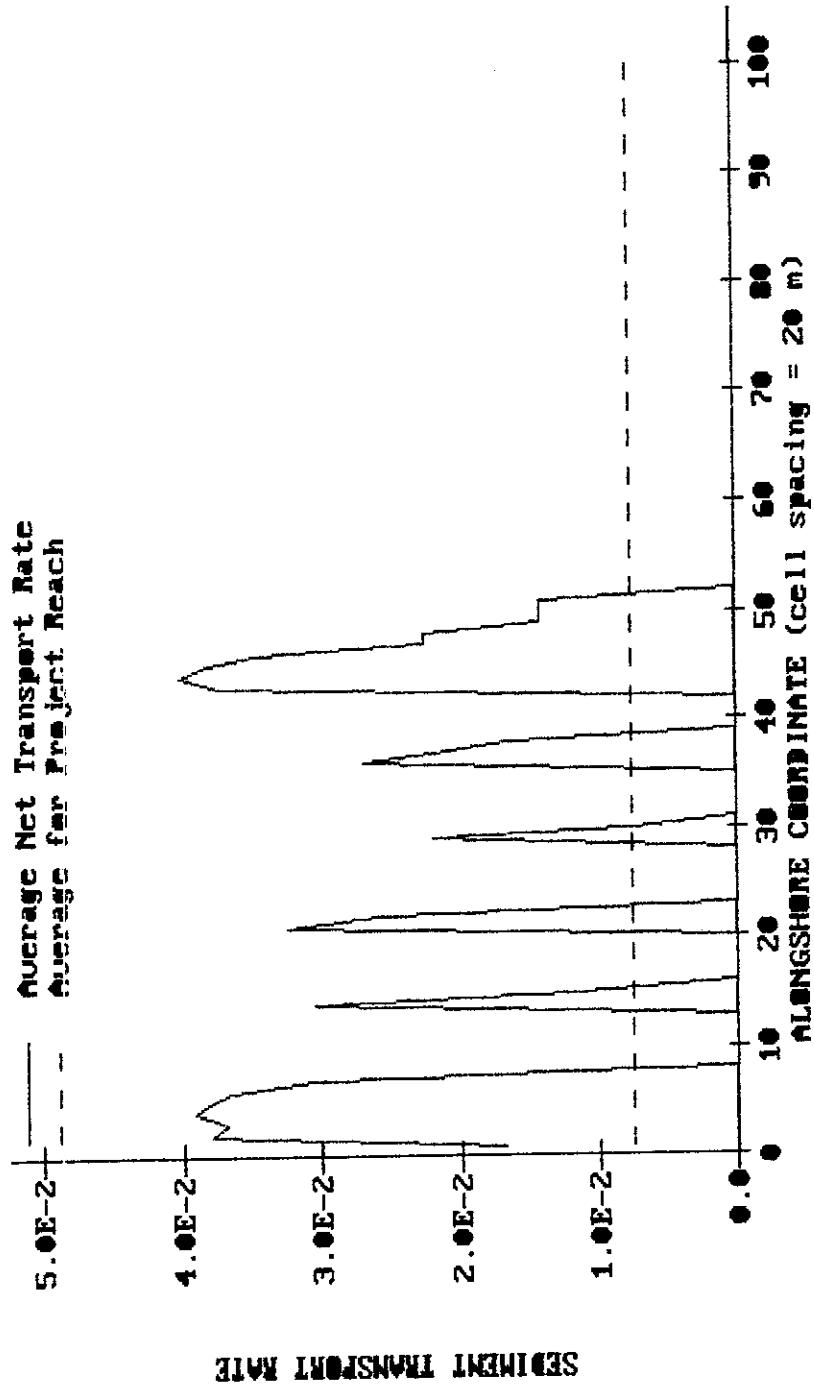


Fig No 59.2. MODELACION OLEAJE W T=4s
 TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

208.



Nota: Unidades en metros cúbicos.

209

FIGURA No 60.1. MODELACION OLEAJE OESTE T=5 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

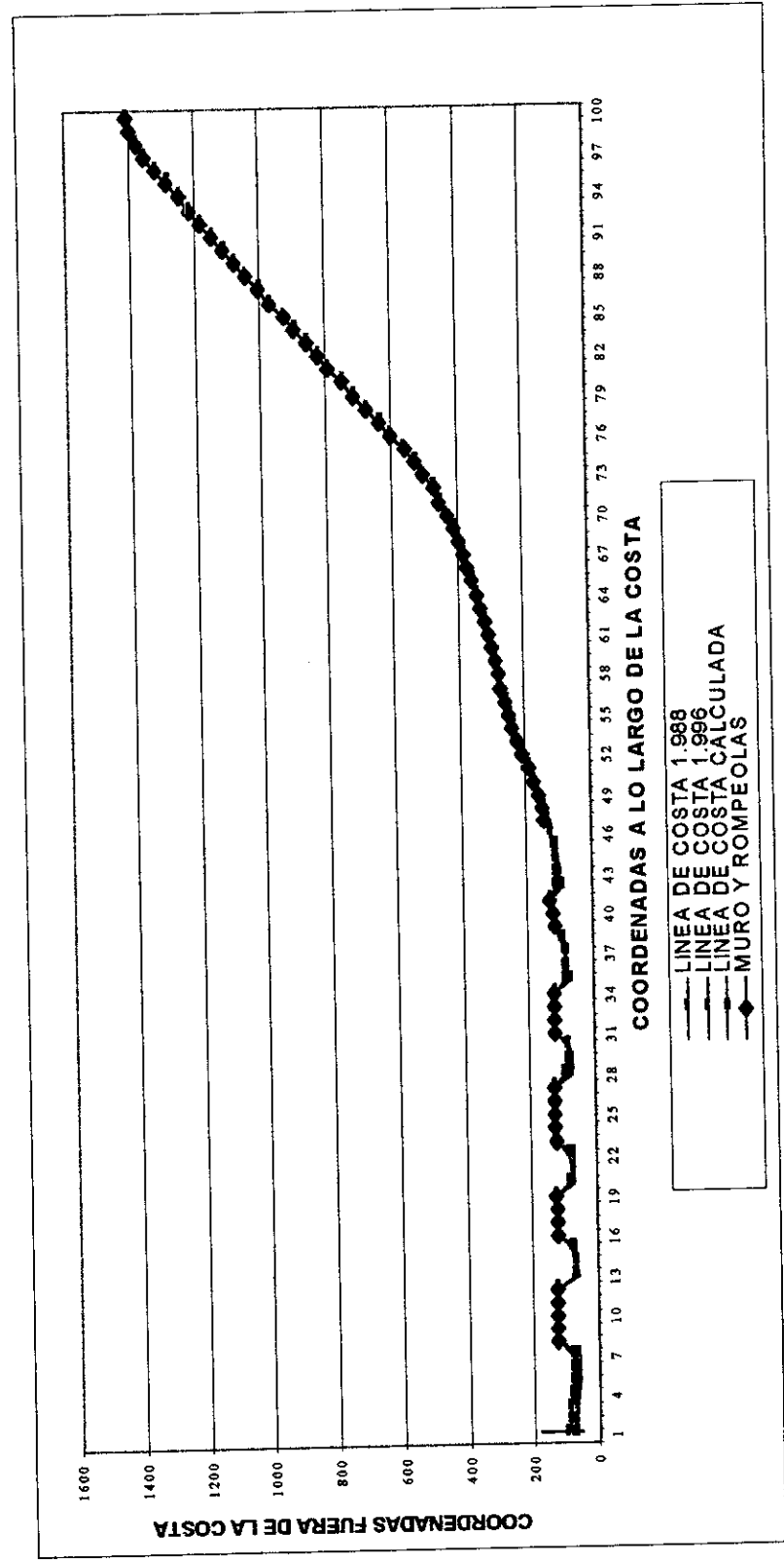
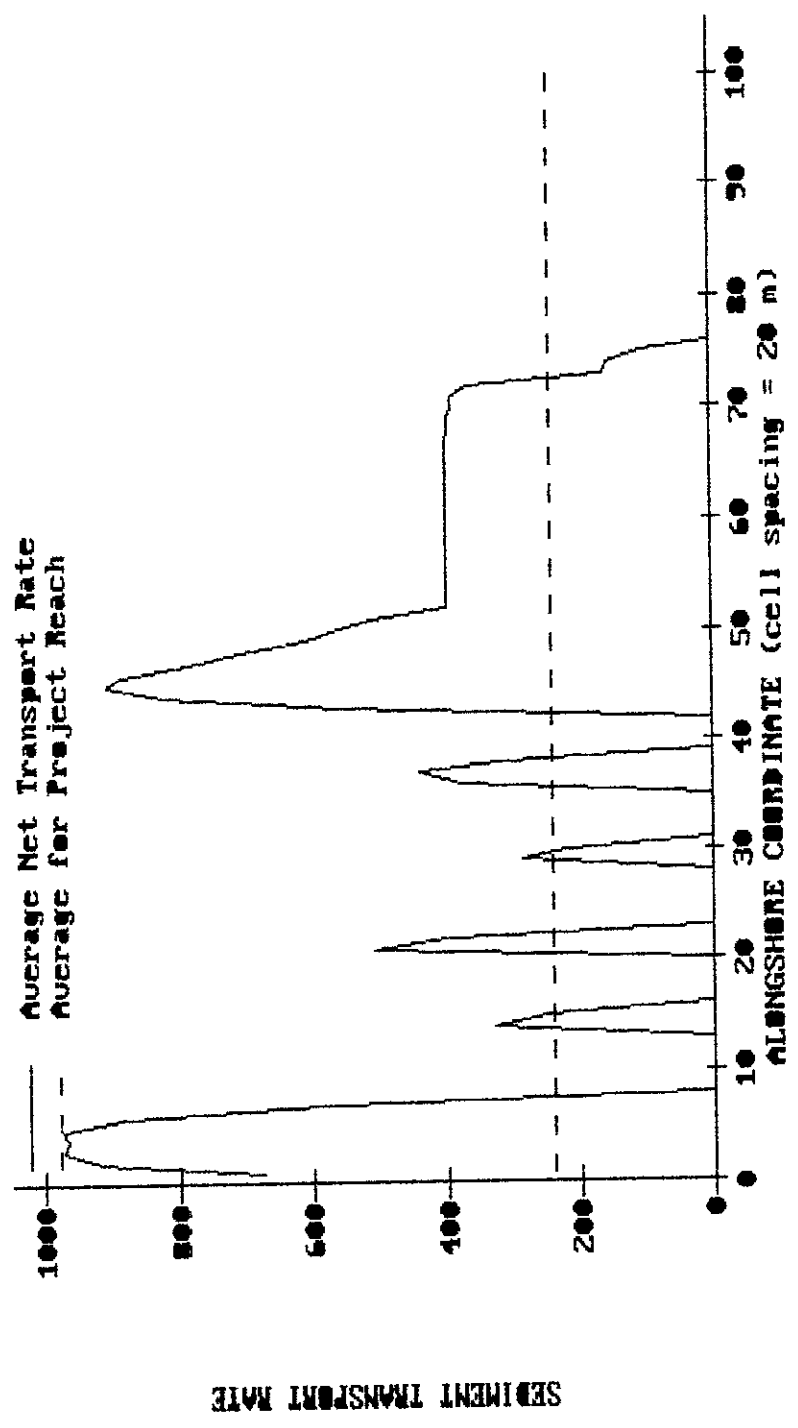


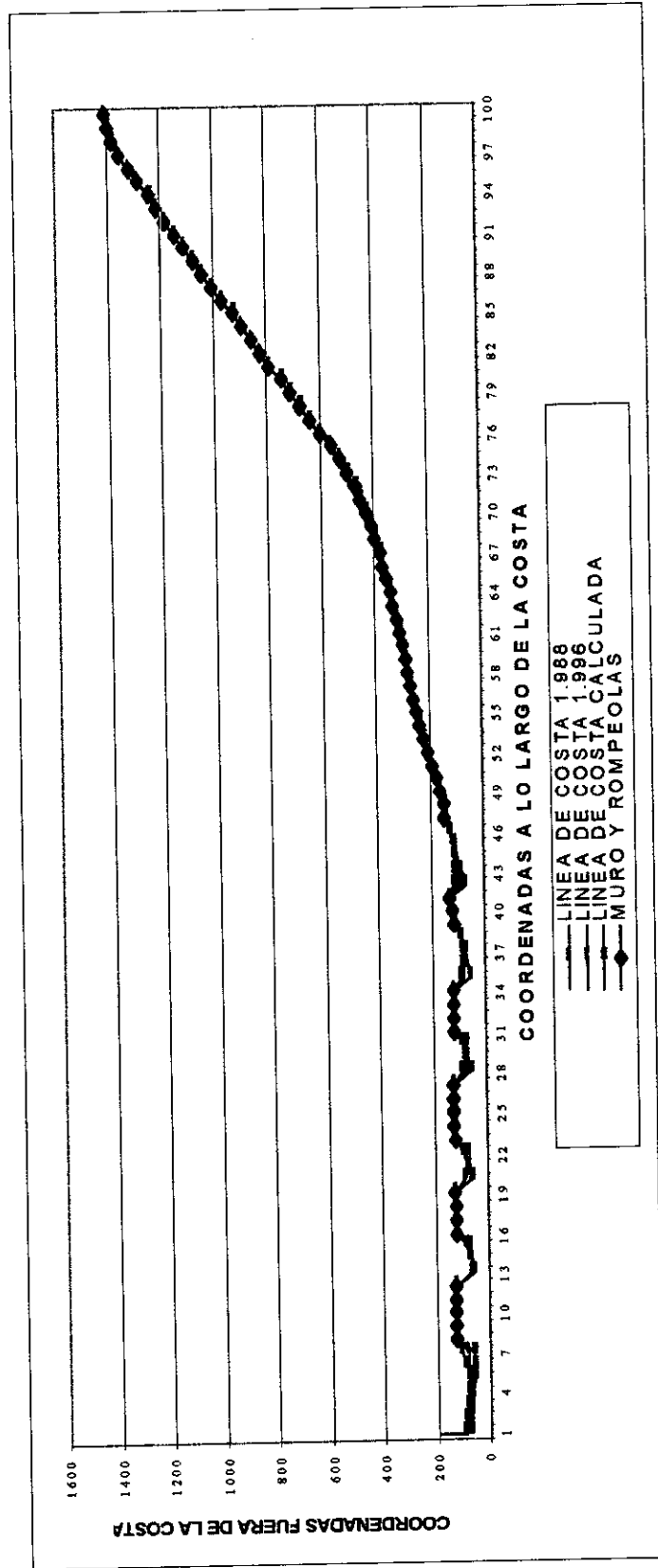
FIGURA. No 60.2. MODELACION OLEAJE W 1988-1996 T=5s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.



Nota: Unidades en metros cubicos.

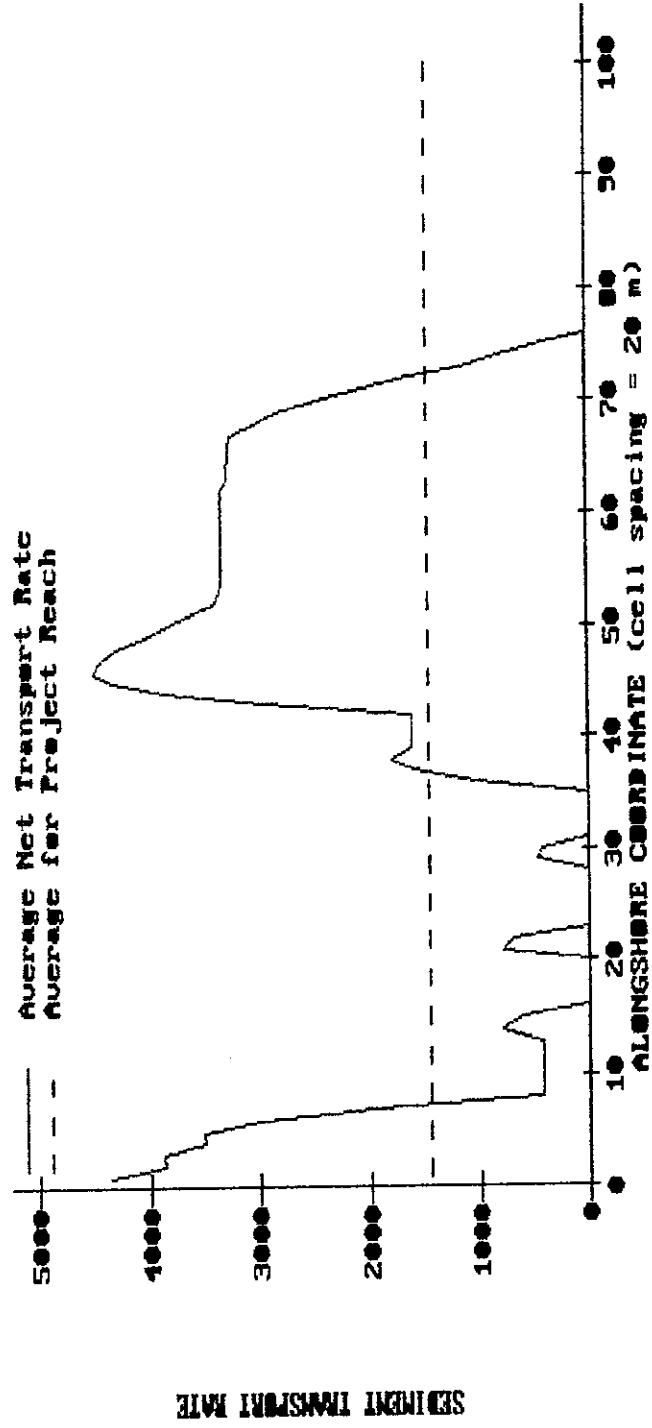
211.

FIGURA No 61.1.1.MODELACION OLEAJE OESTE T=6 SEG. 1.998-1.996
VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.



212.

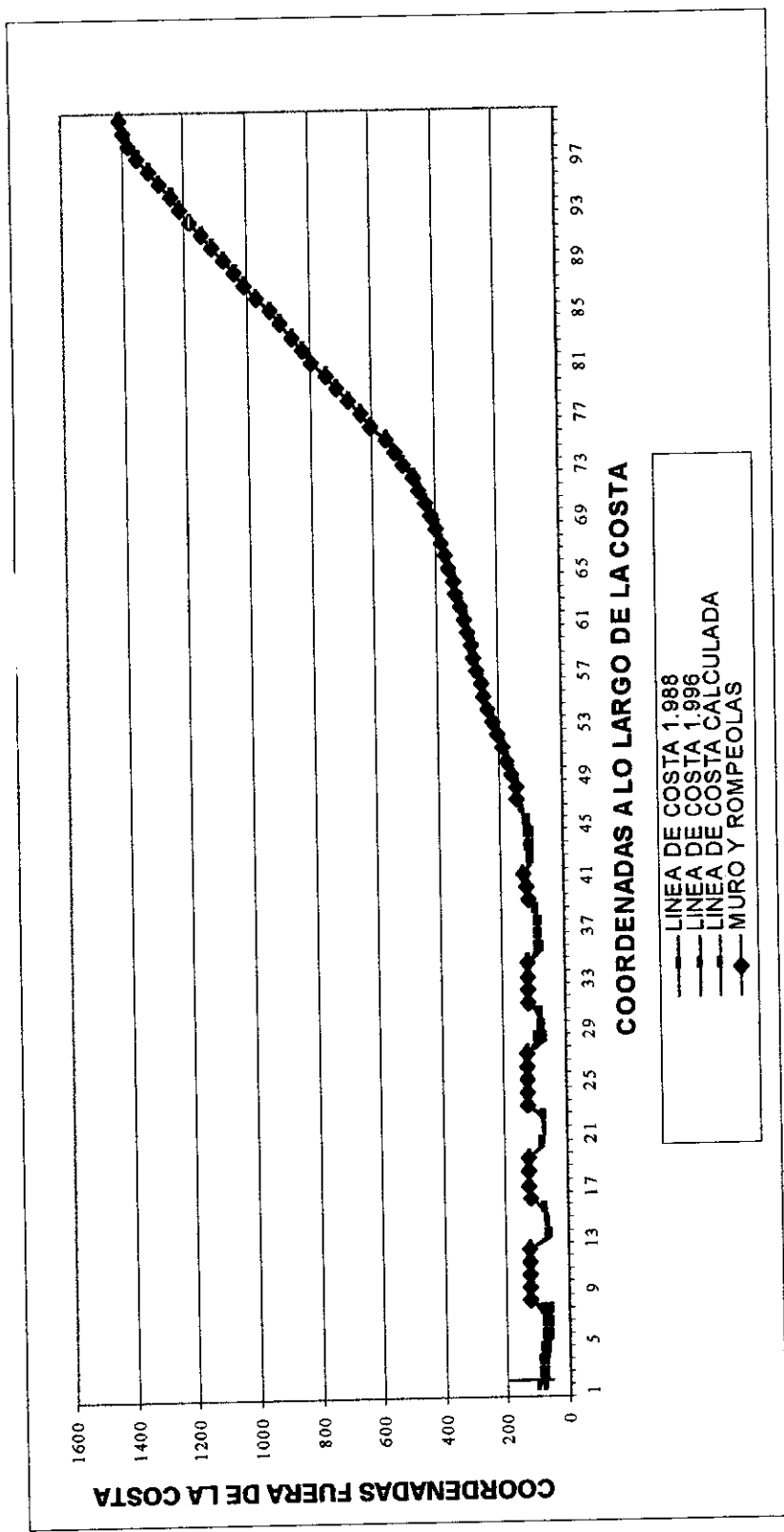
FIGURA. No 61.2. MODELACION OLEAJE W 1988-1996 T=6s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .



Nota: Unidades en metros cúbicos.

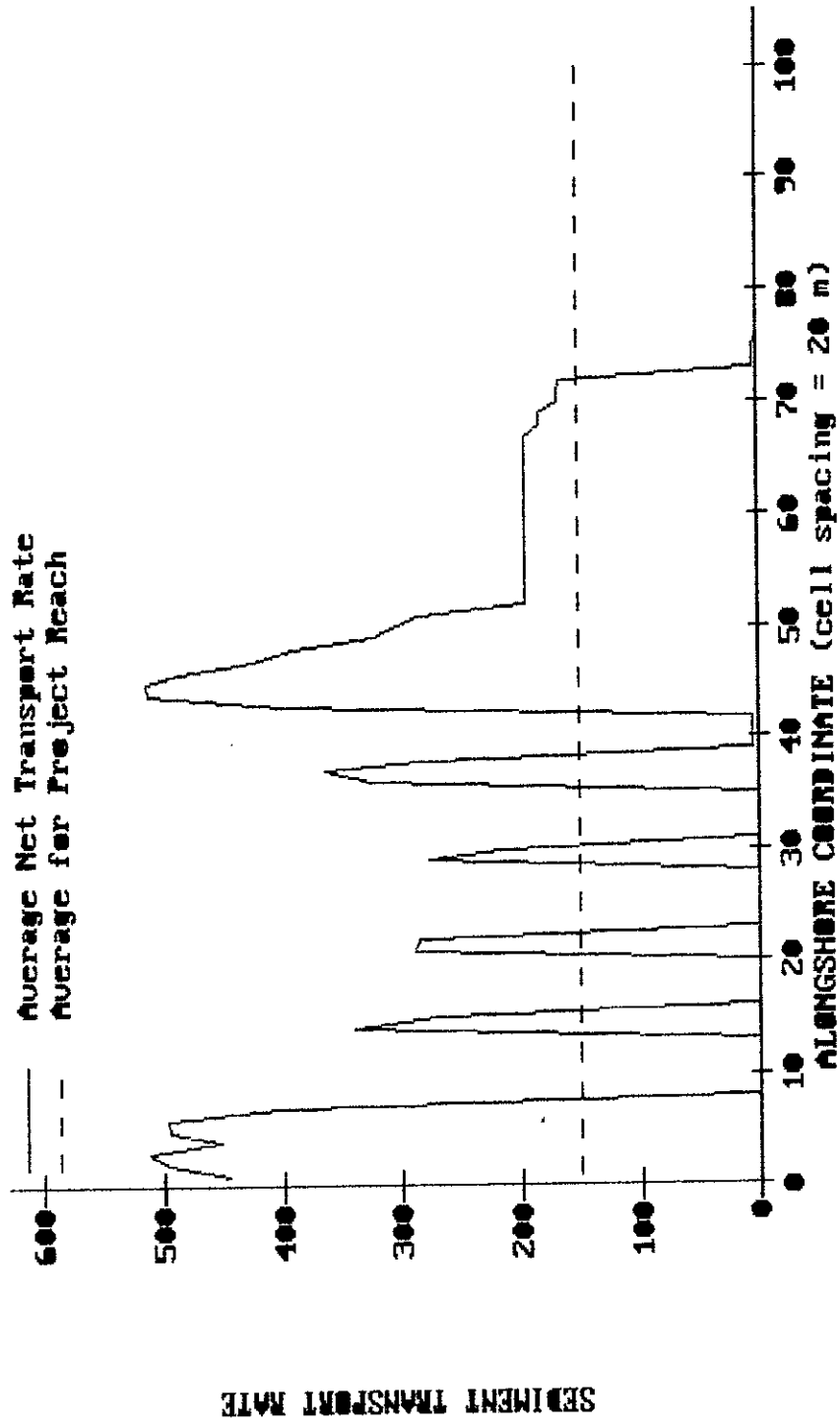
FIGURA No 62.1.1.MODELACION OLEAJE OESTE T=7 SEG. 1.998-1.996.
 VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

213



214

Fig No. 62.2. MODELACION OLEAJE W 1988-1996 T=7s
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.



Nota: Unidades en metros cubicos.

b) Con base en los parámetros de oleaje N, NE, NW y W de la Tabla No 24 y respetando el porcentaje de ocurrencia de cada uno a nivel anual se modeló entre 1.988 y 1.996 con todo el clima de oleaje, variando los valores de K1 y K2, obteniéndose mejor ajuste con los valores 0.11 y 0.06 respectivamente (Ver Figura No. 63). Aparte de asignar estos valores de K1 y K2 fue necesario filtrar las condiciones de oleaje de dirección NE de periodos 7, 8 y 9 segundos, ya que estaban generando distorsión y excesos en el calculo del transporte litoral, ocasionando discontinuidades en los valores de línea de costa calculada.

Esta modelación fue consecuente con el fenómeno de transporte litoral en Bocagrande, ya que la tendencia general del transporte fue de derecha a izquierda .

Se obtuvo un error promedio entre la línea de costa medida y calculada de 8.18 metros, lo cual es un buen valor para calibración, ya que la experiencia internacional que hay en el uso de estos modelos ha demostrado que el rango de error de 10 metros promedio es una buena aproximación al fenómeno.

En cuanto a cambio de volumen en el sector el modelo hizo un calculo de 249.000 M3 entre 1.988 y 1.996, lo cual nos da una tasa de acceso de unos 31.125 M3 /año para el sector modelado, valor que debemos subestimar, por la esquematización hecha dentro de la modelación.

FIGURA No 63.1 MODELACION DE CALIBRACION, 1.988-1.996.
 VARIACION EN LA LINEA DE COSTA.

216.

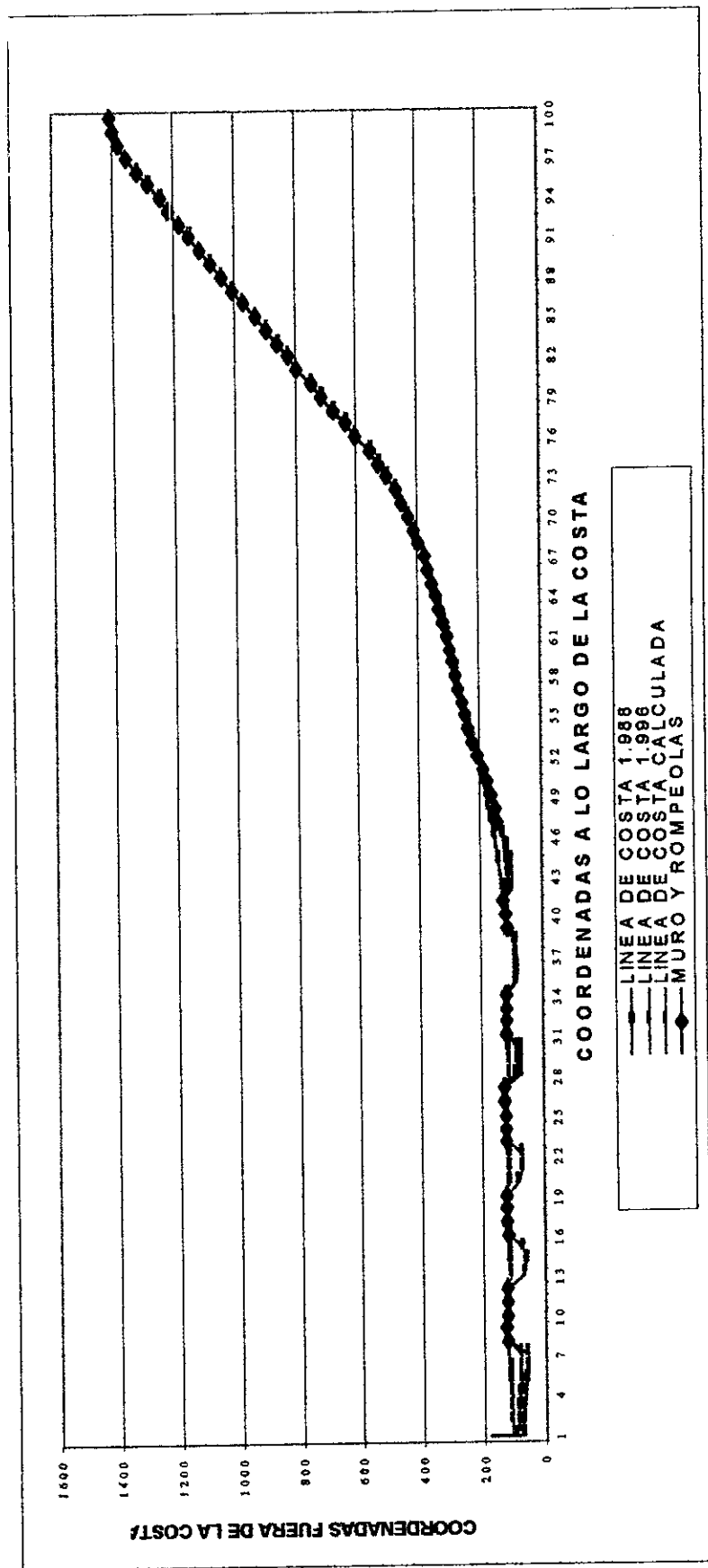
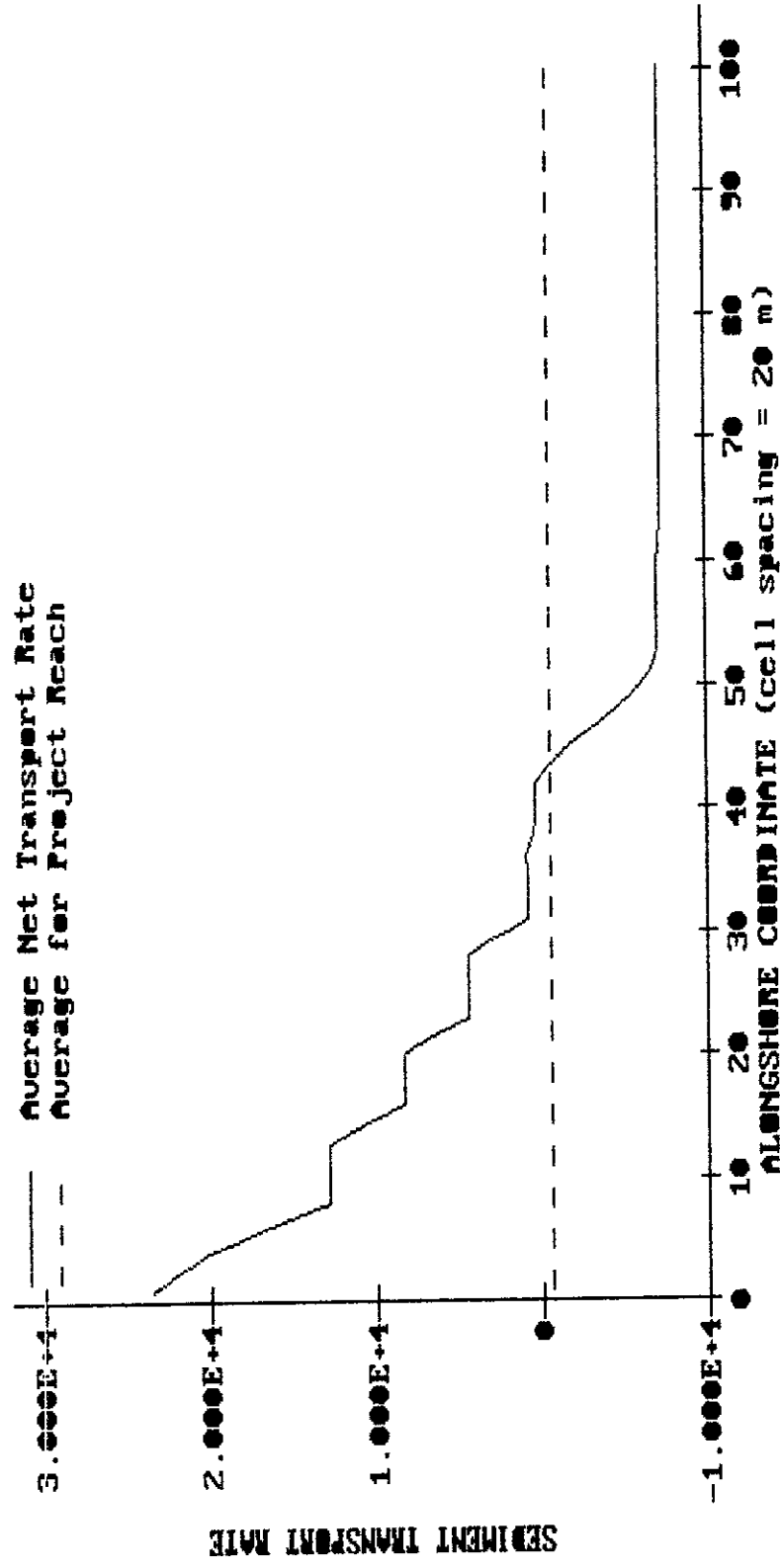


FIGURA. No 63.2. MODELACION DE CALIBRACION 1988-1996
TASA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.



Nota: Unidades en metros cúbicos.

8.3.3 Modelación de tendencias de evolución futura.

Como se dijo la calibración del modelo se realizó con la línea de costa comprendida entre el Sector Capilla del Mar a la altura del espolón E4 y el sector de playa en enrocado frente al Baluarte de Santo Domingo, esta decisión se tomó considerando el hecho de que los otros sectores de Bocagrande habían sufrido una intervención muy directa con rellenos que sería muy difícil de homologar con el modelo. Una vez que se obtuvieron unos parámetros claros en cuanto a valores de coeficientes K1 y K2, y se logró filtrar las condiciones de oleaje más representativas para el sector, el paso siguiente fue evaluar como se comportaba el modelo en cuanto a estimar la evolución futura del sector de persistir los parámetros actuales.

En esta ocasión el tramo modelado fue el comprendido entre el Espolón Iribarren y el Sector el Limbo, entre 1.996 y el año 2.006. Como parámetro de comparación se utilizaron cálculos de volúmenes de erosión y sedimentación hechos por el Ministerio de Transporte entre 1.983 y 1.989.

-Orientación y trazado de ejes.

Se trazó un sistema cartesiano con eje de las Y desviado 35° en sentido antihorario respecto a la dirección Norte, en el sentido a lo largo de la costa se consideraron 100 celdas de 25 metros.

-Condiciones de borde.

Se consideró como condición de borde izquierda al espolón Iribarren, el cual es un limite tipo compuerta. En el lado derecho se consideró como condición de borde el extremo del Sector el Limbo, como limite tipo playa estable.

-Esquemmatización de las estructuras.

Se consideraron representativas para la modelación las siguientes estructuras:

- a) El espolón Iribarren, considerado por su longitud y por la cota a la que llega, como un espolón difractante.
- b) Los espolones E1, E2, E3 y E4 considerados por sus características como espolones no difractantes.
- c) Los cinco rompeolas entre el Hotel Capilla del Mar y el sector El Limbo se esquematizaron como muros o enrocados.
- d) El muro comprendido entre la Calle 12 y el Sector el Limbo.

Los espolones E5 a E9 por sus características no fueron considerados dentro del análisis.

-Datos de oleaje.

Estos fueron los utilizados en el proceso de calibración, habiendo hecho en ellos los ajustes angulares por el cambio de orientación en la línea base (Ver TABLA No 24, Angulo de referencia genesis-alternativas).

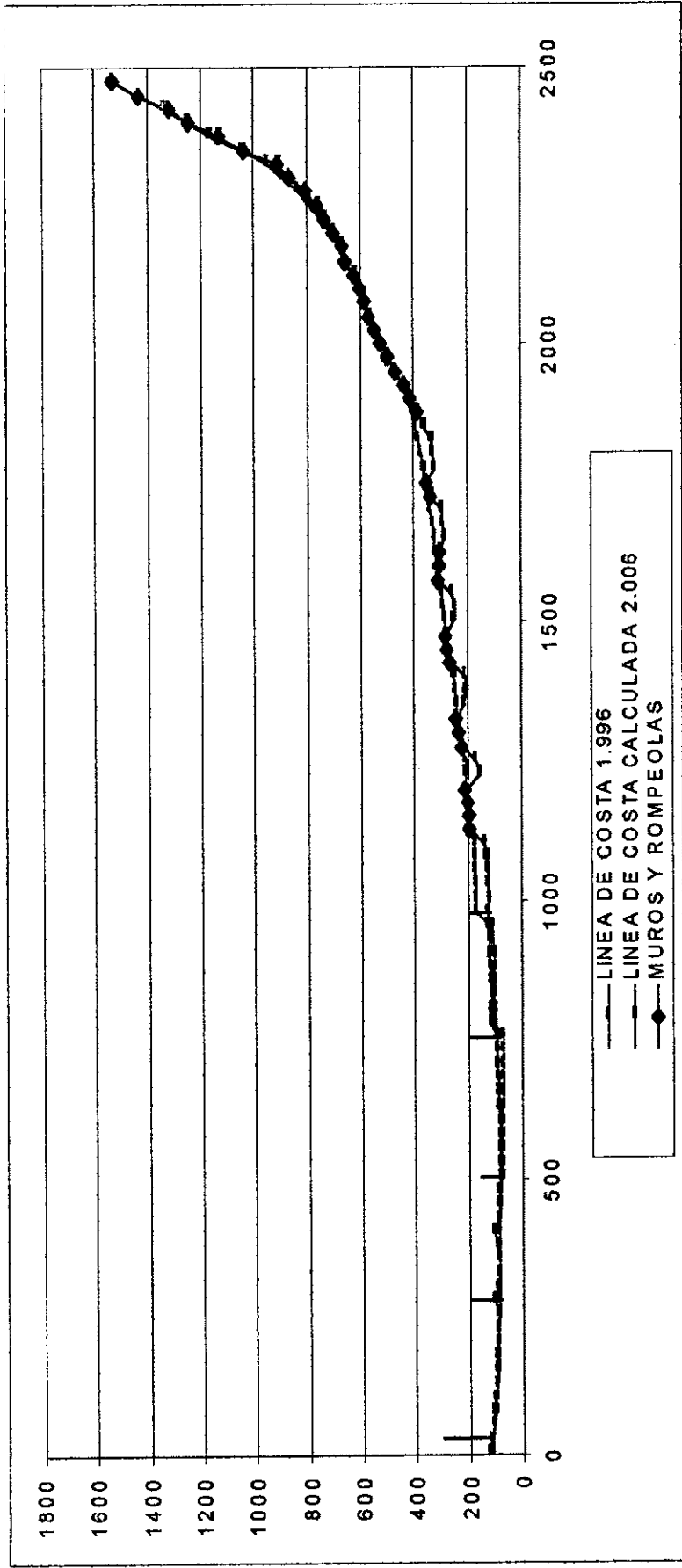
Se consideró un tiempo de modelación de diez años, a partir de 1.996 y se evaluó en cada tramo la variación de la línea de costa, los transportes generados por la acción del oleaje y los volúmenes acumulados y removidos. Los datos de tasa de transporte que se presentan a continuación corresponden al periodo de modelación 1.997-2.006, ya que generalmente el primer año en tiempo de modelación no es muy representativo, ya que el modelo esta partiendo de unas condiciones iniciales, y solo después de un ciclo completo de iteraciones comienza a delinear tendencias.

Se encontró que entre la abscisa 0 y la 300, entre el espolón Iribarren y el Hotel Caribe se produjo una erosión con una rata de $-0,645 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}$, lo cual concuerda a nivel de tendencia con los valores de para ese sector calculados por el Ministerio de Transportes entre julio de 1.983 y febrero de 1.988, del orden de $-14.26 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}$. (Figura No 64)

Entre la abscisa 300 y la 800, entre el Hotel Caribe y el espolón de la calle 6^oa (E3) se calculó una rata de erosión de $-12,13 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}$, valor que solo concuerda a nivel de tendencia con el valor calculado para el sector en el lapso de agosto de 1.988 y abril de 1.989, época en que el sector sufrió una intensa erosión por el huracán Joan y los mares de leva subsiguientes, calculando el Ministerio de transporte una rata de erosión de $-53.28 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}$.

FIGURA No 64. MODELACION DE EVOLUCION DE TENDENCIA FUTURA.
1.996-2.006

221



Entre la abscisa 800 y la 1.200, entre el espolón de la Calle 6ª y el Hotel Capilla del mar se calculó una tasa de sedimentación del orden de 16,09 m³/año/m, valor que concuerda a nivel de tendencia con el calculado por el Ministerio de Transporte entre julio de 1.983 y febrero de 1.988 del orden de 58.29 m³/m/año.

Entre la abscisa 1.200 y la 2.450, entre el Hotel Capilla del Mar y el Sector el Limbo se calculó una tasa de sedimentación neta de 24.16 m³/m/año, que a nivel de tendencia concuerda con la fenomenología de este tramo.

8.3.4 Presentación de hipótesis de evolución de la línea de costa.

Teniendo en consideración la fenomenología del tránsito de arenas hacia Bocagrande, las variaciones en la línea de costa, las tendencias evaluadas a nivel de oleaje, las medidas disponibles de transporte de sedimentos y las tendencias estimadas a través de la modelación nos atrevemos a adelantar la siguiente hipótesis sobre la evolución de la línea de costa de Bocagrande:

A nivel global la evolución del sector entre 1.988 y 1.996 estuvo orientada hacia la estabilidad, sin mayor avance en líneas generales de la línea de costa por procesos naturales, presentándose acumulación de sedimento en el sector Sur por los rellenos hechos en 1.991 y escasa acumulación en el sector Norte, a pesar de las estructuras presentes.

Esta tendencia puede explicarse por la intervención que ha sufrido el litoral de Cartagena de Indias desde el Sector de Crespo y Marbella en adelante (y localmente por las estructuras aguas arriba del Sector el Limbo) lo cual a nivel global ha redundado en una disminución en los volúmenes de acresión de el sector de Bocagrande, estos procesos podrían incrementarse de no manejarse bien proyectos que afectarán la dinámica de sedimentos de todo el litoral de Cartagena como las obras de estabilización de la boca de la Bocana en la Ciénaga de la Virgen. Concluimos por todos estos datos que el nivel de transporte presente en estos momentos no es lo suficientemente alto como para plantear soluciones de estabilización que estén fundamentadas en la intersección del sedimento circulante.

Entre el espolón Iribarren y el espolón E4, los rellenos realizados en 1.991 han permitido que este sector se recupere de los procesos erosivos que sufrió entre 1.988 y 1.989, pero la modelación de tendencias de evolución futura nos permite establecer que en este tramo existe una tendencia a la erosión, la cual de acuerdo a los hechos pasados en este sector puede ser importante de presentarse eventos extremos como el Huracán Joan.

Entre la Calle 8ª y la Calle 9ª no se presentó variación significativa en los últimos 8 años. Entre la Calle 9ª y la Calle 11 se presentaron avances entre los 10 y los 20 mts. Por la forma simétrica de los tombolos alrededor de las estructuras de este tramo podemos decir que a pesar de ser en general la tendencia del transporte de derecha izquierda, los diferentes oleajes generan en ambas direcciones un aporte de sedimentos, que ha redundado a lo largo de los años en una tendencia a la estabilidad.

Entre la calle 12 y el fin del sector el Limbo las estructuras presentes en parte por sus mismas características y en parte por disminución en el aporte de sedimentos que ha sufrido Bocagrande, no han generado playa, sin embargo algo de acresión se ha presentado en el sector.

El tramo comprendido entre el espolón de la calle 6^oa y el sector el Limbo de acuerdo a las observaciones y la modelación de evolución futura del sector tiende a la estabilidad y a una leve acresión, lo cual coincide con lo anteriormente expuesto.

8.3.5 Análisis y modelación de alternativas.

Una vez calibrado el modelo, este tiene la capacidad de aceptar diferentes configuraciones de estructuras de protección y rellenos y evaluar los efectos de estos sobre la línea de costa (considerando la acción del oleaje como agente activo).

Los parámetros técnicos a tenerse en cuenta para evaluar cada configuración o alternativa son: efectos de una obra determinada sobre la línea de costa (avance o retroceso de la misma en ciertos sectores) y variaciones inducidas por la alternativa en el régimen de transporte de sedimentos de la zona.

Para la evaluación de los anteriores parámetros (Cambio en la línea de costa y Tasa de transporte a lo largo de la costa) contamos con los resultados que el modelo aporta, la teoría existente y disponible en Hidráulica Marítima e Ingeniería de costas y la experiencia que pueda documentarse sobre proyectos semejantes.

Un modelo numérico no es la última palabra en el momento de evaluar y decidir cual es la mejor en un abanico de alternativas, es solo una herramienta, cuyo aporte en la toma de decisiones debe ser contrapesado con mediciones, verificaciones, análisis de las teorías que estructuran el modelo, buen entendimiento de la fenomenología que se involucra en el proyecto y el criterio de Ingenieros de buena experiencia que se puedan consultar.

Las modelaciones de alternativas partieron del supuesto de que la Avenida Primera será ampliada de 2 a 4 carriles, buscando entonces modelar la ampliación de la franja de playas a través de rellenos y estructuras de protección para conservar y asegurar el trazado de la vía modificada.

No es objetivo de esta tesis hacer un diseño estricto y completo de la vía Avenida Primera de Bocagrande. Recomendamos que el diseño formal de la carretera ampliada (Actualización de análisis de tránsito, trazado geométrico, diseño de drenajes, diseño de pavimento, etc) sea objeto de otra tesis.

La ampliación de la vía implica la construcción de dos carriles adicionales, un separador y posible ampliación del paseo peatonal existente, consideramos que para este desarrollo un espacio paralelo a la actual vía de 15 metros es suficiente. Por lo anterior el criterio para elegir la alternativa más indicada será que pasado por lo menos diez años provea un espacio de playa que sea 15 metros más ancho que la línea de costa utilizada como inicial, garantizándose así el espacio adecuado para la ampliación de la vía proyectada sin vulnerar el espacio de playa existente, brindándose una solución que tenga una vida útil no inferior a una década.

La ampliación de la Avenida Primera esta prevista para el año 2.010, y la ultima línea de costa que disponemos es de 1.996, considerando las actuales tendencias de evolución ya establecidas, concluimos que el análisis de alternativas cubriendo un tiempo entre 1.996 y el año 2.006 nos puede dar un buen parámetro de escogencia.

Pero antes de acometerse cualquier obra deberá verificarse nuestro análisis con una batimetría y una línea de costa más actualizada.

Para la evaluación de las alternativas de protección y ampliación de las playas el tramo modelado fue el comprendido entre el espolón Iribarren y el Sector el Limbo.

Como parámetro de comparación se utilizó la línea de costa calculada para el año 2.006 producto de la modelación de las tendencias de evolución futura.

El trazado de los ejes, los datos de oleaje y condiciones de borde fueron los mismos considerados en la modelación de tendencias de evolución futura.

La esquematización de las estructuras se reseña a continuación en cada modelación evaluada. Con base en las tendencias de evolución del sector y las actuales condiciones de las playas consideramos que el sector más crítico de la zona esta entre la Calle 8° y el Sector el Limbo, ya que allí la playa presenta menor anchura respecto al eje de la vía, siendo especialmente sensible el tramo de playa ubicado en las inmediaciones de la calle 11° (Abscisa 1.850), debido al cambio de dirección que sufre allí la línea de costa y la concentración de energía que allí se presenta producto de los oleajes del sector W.

8.3.5.1 Modelación de relleno sin estructuras de retención.

El sembrado de arena, sin la ayuda de estructuras rígidas de protección seria una intervención que rompería con todos los esquemas hasta ahora vigentes en cuanto a estrategias de estabilización global de Bocagrande, ya que desde 1.952, cuando se hicieron las primeras obras de protección de playa por la ANDIAN la ruta seguida fue el uso de estructuras rígidas acompañadas ocasionalmente por rellenos.

Esta predilección por las soluciones duras en lugar de los rellenos es explicada por I.r H.J Verhagen en la publicación "Coastline Management (Lectures Notes. I.H.E Delft (abril de 1.996))".

“La técnica del relleno artificial es colocar arena de manera tal que la línea de costa avance, con la intención de que al erosionarse esta línea de costa que ha avanzado se proteja la línea de costa original. Es decir se coloca la arena sabiendo que esta será arrastrada por los procesos naturales.

Esta parte es difícil de explicar al público y a los políticos los cuales piensan que el nuevo ancho de playa se mantendrá, y que piensan que el relleno ha sido un fracaso una vez que la playa ha retrocedido tras la primera tormenta. Lo que no pueden ver es que la playa se ha adaptado a un nuevo perfil más natural ya que la arena ha ido a la zona de playa sumergida.

También cuando se debe repetir el relleno después de un par de años eso no sorprende a los técnicos en manejo de costas pero sí a los políticos, que prefieren una solución “para siempre”.

Otro problema de manejo de los rellenos es que se debe trabajar sobre ellos más o menos a intervalos regulares. Después de cierto número de años, debe haber dinero disponible para ejecutar el mantenimiento del relleno. El intervalo no es constante y depende del número de tormentas que se presenten durante el intervalo dado. Algunas veces el intervalo puede ser de una vez cada siete años, a veces una vez cada tres años, etc.

Esto requiere cierta flexibilidad en el sistema de mantenimiento, lo cual no es siempre posible cuando este depende de las finanzas publicas.

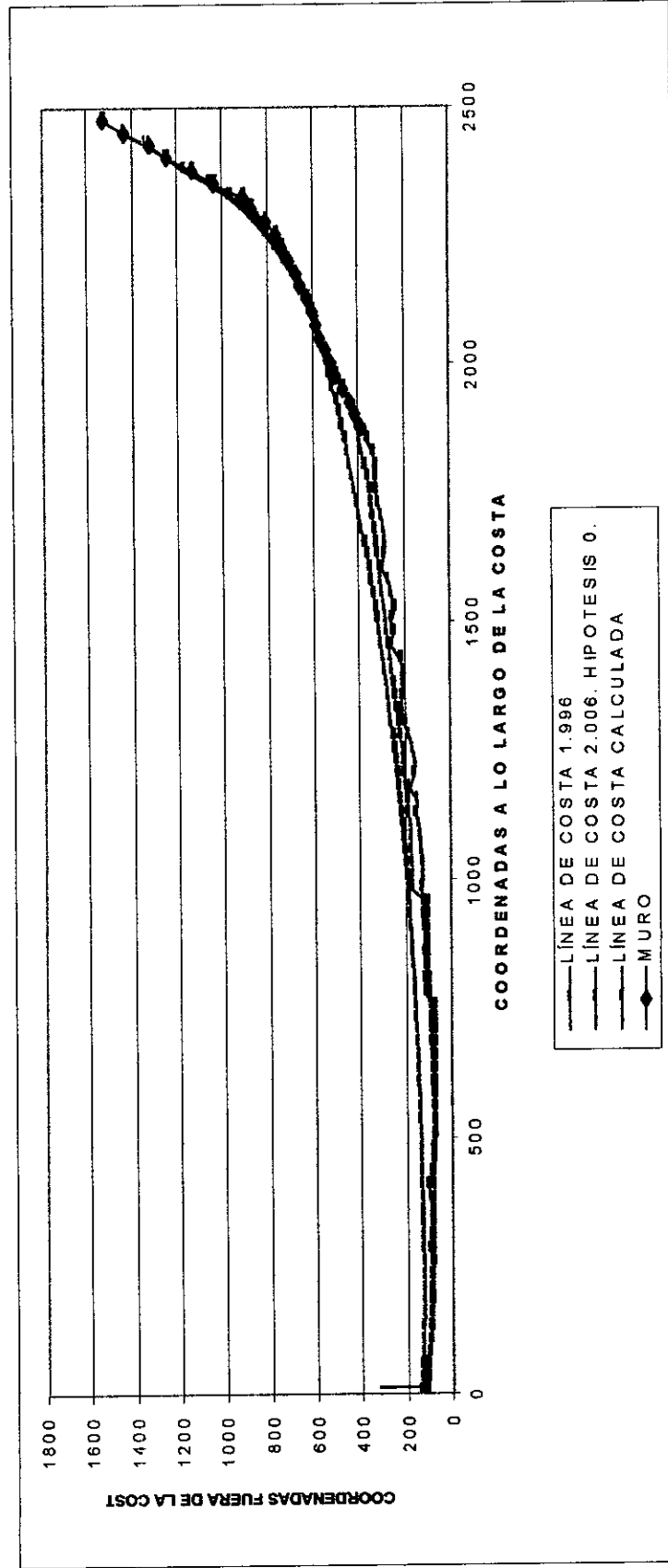
Los rellenos siguen siendo una forma muy atractiva de hacer manejo de línea de costa, a pesar de que puntos de vista políticos deseen optar por otra cosa”.

Para nuestro caso especifico consideramos evaluar un relleno artificial, sin estructuras desde el espolón Iribarren (usado como condición de borde izquierda) hasta el sector el Limbo. El ancho de este relleno se plantea de 30 metros entre la abscisa 0 y la 1.150 y de 50 metros entre la abscisa 1.150 y la 2.250.

Se obtuvo a los diez años de modelación un avance generalizado y consistente de la línea de costa en todos los sectores (Ver Figura No 65). En el primer tramo (es decir entre la abscisa 0 y 1.150) se presenta una tendencia al equilibrio y conservación del relleno de treinta metros sembrado, esto debido a que dicho sector recibe los aportes de arena de los otros sectores más al Norte que también fueron rellenados, evitándose así su erosión. En el segundo tramo (entre las abscisas 1.150 y la 2.250) se observa hacia el limite derecho del relleno un retroceso del orden de los veinte metros, lo cual a pesar de todo deja espacio suficiente para la ampliación de la vía y la franja de playas.

FIGURA No 65. MODELACION DE ALTERNATIVAS DE SOLUCION.
RELLENO ARTIFICIAL SIN ESTRUCTURAS

230



Pese a ser una alternativa viable técnicamente implicaría un programa de conservación a largo plazo y tendría que enfrentar la resistencia que generan las soluciones blandas en los sectores con capacidad de decisión.

8.3.5.2 Modelación de espolones.

Considerando las tendencias de evolución del sector en cuanto a variación en la línea de costa y transporte de sedimentos la extensión de los espolones actuales, o la construcción de otros adicionales no produciría incremento apreciable en las playas y posiblemente generaría procesos erosivos en el sector Sur de las playas.

Esta apreciación era planteada ya en 1.989 por los miembros del equipo del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos en el estudio "Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y el Laguito. 1.983-1.989", en los siguientes términos:

"Considerando que con excepción del espolón Iribarren, que amplió las playas reteniendo parte del sedimento transportado desde el Norte por el oleaje, los demás espolones construidos en diferentes épocas en el sector han traído como consecuencia el retroceso del sector Sur de las playas, no se recomienda la construcción de más espolones en el sector a menos que funcionen como estructuras de retención de relleno.

Al contrario, si se pretende lograr la recuperación de las playas únicamente mediante espolones es muy probable que se intensifique aún más la erosión en el sector Sur. Además debe tenerse en cuenta que el efecto de estas estructuras no es inmediato, sino que se requiere un periodo de tiempo que puede ser de algunos meses o años, dependiendo entre otros factores de las condiciones locales de oleaje”.

Con todo, modelando hemos querido evaluar esta fenomenología que le atribuimos a los espolones, tratando que los parámetros asociados a estas estructuras sean los mejores.

Los elementos básicos para parametrizar una batería de espolones son: profundidad a la que llegan, longitud y espaciamiento entre estructuras.

La profundidad a la que llegan las puntas de los espolones es un factor clave, ya que la idea es que la estructura intercepte un porcentaje determinado del transporte litoral de arenas, y este transporte depende directamente de las características del oleaje en rotura, a su vez la rotura del oleaje local esta asociada a un determinado rango de profundidades. En nuestro caso de estudio como ya se anotó en la sección de análisis de franja de rotura del oleaje, el 74,56% de las olas rompen entre la cota -2.0 metros y la orilla y el 46,49% entre la cota -1.0 metros y la orilla. Esto nos da un índice de que porcentajes del transporte litoral potencial se puede retener de extender los espolones actuales hasta la cota -2.0 o -1.0 metros.

Otro elemento a tener en cuenta fue el hecho de que las estructuras deben incrementarse en extensión (para alcanzar mayor profundidad) en el sentido de la deriva, es decir se debe evitar que los espolones que más interceptan sedimento queden aguas arriba de los demás.

Se tuvo en cuenta además que el espaciamiento entre los espolones no debe superar un valor igual a tres veces el valor de la longitud del espolón.

Otro factor limitante de las características de los espolones modelados es el alejamiento que sufren las línea batimétricas de -1.0 y -2.0 metros respecto a la orilla en el sector comprendido entre la Calle 10° y la Calle 13° , por el brusco cambio de dirección en la línea de costa que se presenta en este tramo, hecho que hace antieconómico el alcanzar estas cotas con las estructuras. A su vez las cotas -1.0 y -2.0 metros se aproximan a la costa en el sector entre el espolón Iribarren y la Calle 6° facilitándose llevarles a mayores profundidades en esta zona.

Teniendo en cuenta los anteriores factores se modelaron varias configuraciones de espolones, considerándose las más relevantes las mostradas a continuación.

8.3.5.2.1 Modelación de espolones hasta la cota -1.0 mts.

La configuración de la batería de espolones de esta modelación (Ver Tabla No 28 y Figura No 66), generó escasa acresión propiciando procesos erosivos en diferentes sectores en especial entre las abscisas 1.650 y 1.175.

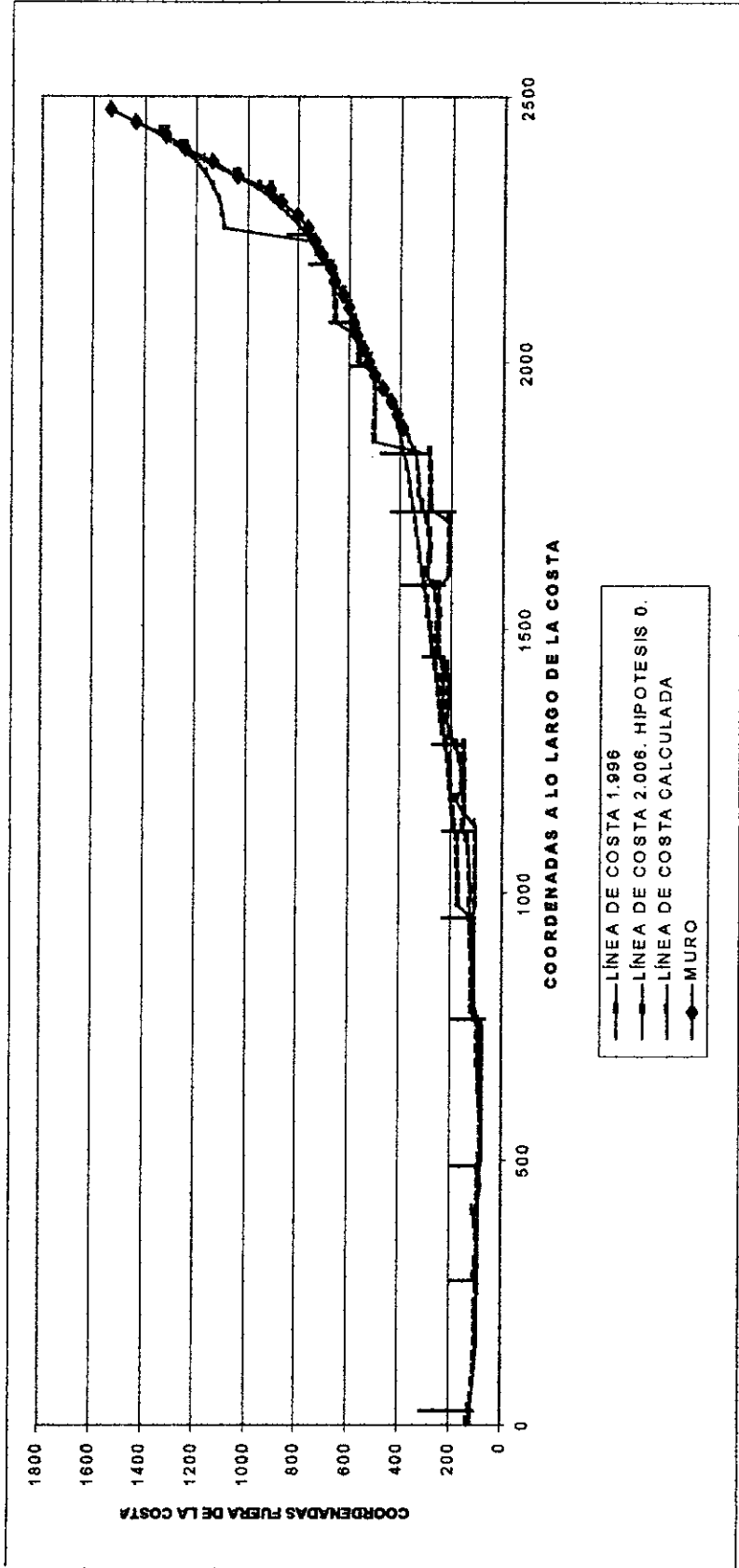
TABLA No 28. CONFIGURACION DE ESTRUCTURAS MODELADAS

| Estructura | Ubicación | Características |
|-------------------|---|---|
| Espolón Iribarren | Extremo sur de la Península de Bocagrande. Celda 1, abscisa 0. | Llega a la cota -2.75 mts, con 156 mts de longitud desde la orilla. |
| Espolón E1 | Frente al Hotel Caribe. Celda 11, abscisa 250. | Llega a la cota -1.0 mts. |
| Espolón E2 | Entre la Calle 4ª y la Calle 5ª. Celda 21, abscisa 500 | Llega a la cota -1.0 mts |
| Espolón E3 | Frente a la Calle 6ª. Celda 32, abscisa 775. | Llega a la cota -1.0 mts. |
| Espolón E4 | Frente a la Calle 7ª. Celda 40, abscisa 975 | Llega a la cota -1.0 mts |
| Espolón E5' | Frente a la Calle 8ª. Celda 47, abscisa 1.150. | Llega a la cota -1.0 mt. |
| Espolón E6' | Entre la Calle 8ª y la 9ª. Celda 53, abscisa 1.300 | Llega a la cota -1.0 mt |
| Espolón E7' | Entre la Calle 9ª y la 10ª. Celda 59, abscisa 1.450 | Llega a la cota -1.0 mt |

| Estructura | Ubicación | Características |
|-------------------|---|--------------------------------|
| Espolón E8 | Sobre la Calle 10 ^a . Celda 65, abscisa 1.600 | Llega sobre la cota -0.76 mts. |
| Espolón E9 | Sobre la Calle 11°. Celda 70, abscisa 1.725 | Llega sobre la cota -0.75 mts. |
| Muro | Entre la Calle 11° y el Sector el Limbo. Celda 76 a100. Abscisa 1.875 a 2.475. | Muro con borde sobre el agua |
| Espolón E5 | Entre la Calle 11° y la 12°. Celda 75, abscisa 1.850. | Llega a la cota -0.73 metros. |
| Espolón E6 | Entre la Calle 12° y la 13°. Celda 81, abscisa 2.000 | Llega a la cota -0.61 mts. |
| Espolón E7 | Entre la Calle 13° y 14°. Celda 84, abscisa 2.075 | Llega a la cota -1.0metros |
| Espolón E8 | Entre la Calle 14° y 15°. Celda 89, abscisa 2.200 | Llega a la cota -1.0 mts |
| Espolón E9 | Al final del sector el Limbo. Celda 91, abscisa 2.250 | Llega a la cota -1.0 mts |

FIGURA No 66. MODELACION DE ALTERNATIVAS DE SOLUCION.
ESPOLONES HASTA LA COTA -1.0 MTS.

236



8.3.5.2.2 Modelación de espolones hasta la cota -2.0 mts.

Se modeló la configuración descrita en la Tabla No 29 y la Figura No 67.

TABLA No 29. CONFIGURACION DE ESTRUCTURAS MODELADAS

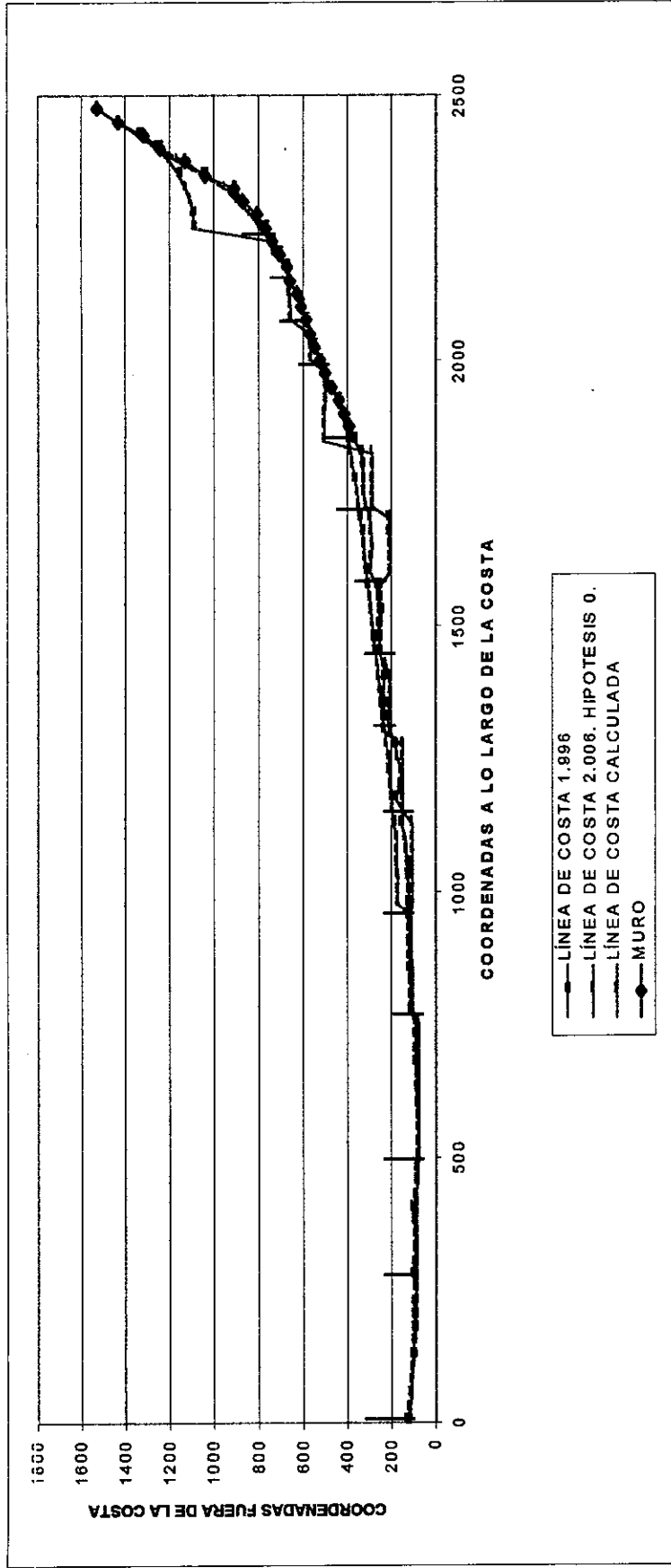
| Estructura | Ubicación | Características |
|-------------------|---|--|
| Espolón Iribarren | Extremo sur de la Península de Bocagrande. Celda 1, abscisa 0. | Llega a la cota -2.75 mts, con 156 mts de longitud desde la orilla. |
| Espolón E1 | Frente al Hotel Caribe. Celda 11, abscisa 250. | Llega a la cota -2.0 mts. |
| Espolón E2 | Entre la Calle 4ª y la Calle 5ª. Celda 21, abscisa 500 | Llega a la cota -1.5 mts |
| Espolón E3 | Frente a la Calle 6ª. Celda 32, abscisa 775. | Llega a la cota -1.0 mts. |
| Espolón E4 | Frente a la Calle 7ª. Celda 40, abscisa 975 | Llega a la cota -1.0 mts |
| Espolón E5 | Frente a la Calle 8ª. Celda 47, abscisa 1.150. | Llega a la cota -1.0 mt. |
| Espolón E6 | Entre la Calle 8ª y la 9ª. Celda 53, abscisa 1.300 | Llega a la cota -1.0 mt |
| Espolón E7 | Entre la Calle 9ª y la 10ª. Celda 59, abscisa 1.450 | Llega a la cota -1.0 mt |

| Estructura | Ubicación | Características |
|-------------------|---|--------------------------------|
| Espolón E8' | Sobre la Calle 10 ^a . Celda 65, abscisa 1.600 | Llega sobre la cota -0.76 mts. |
| Espolón E9' | Sobre la Calle 11°. Celda 70, abscisa 1.725 | Llega sobre la cota -0.75 mts. |
| Muro | Entre la Calle 11° y el Sector el Limbo. Celda 76 a 100. Abscisa 1.875 a 2.475. | Muro con borde sobre el agua |
| Espolón E5 | Entre la Calle 11° y la 12°. Celda 75, abscisa 1.850. | Llega a la cota -0.73 metros. |
| Espolón E6 | Entre la Calle 12° y la 13°. Celda 81, abscisa 2.000 | Llega a la cota -0.61 mts. |
| Espolón E7 | Entre la Calle 13° y 14°. Celda 84, abscisa 2.075 | Llega a la cota -1.0 metros |
| Espolón E8 | Entre la Calle 14° y 15°. Celda 89, abscisa 2.200 | Llega a la cota -1.0 mts |
| Espolón E9 | Al final del sector el Limbo. Celda 91, abscisa 2.250 | Llega a la cota -1.0 mts |

Esta configuración de batería de espolones genera algo de acresión en el sector Norte de las playas y procesos erosivos de magnitud variable en el sector Sur.

239.

FIGURA No 67. MODELACION DE ALTERNATIVAS DE SOLUCION
ESPOLONES HASTA LA COTA -2.0 MTS.



Una vez evaluada a través de la modelación diferentes configuraciones de espolones y teniendo en cuenta las experiencias previas que con este sistema se ha tenido en este sector podemos concluir que las alternativas basadas en el uso de este tipo de estructuras que solo dependan de la retención de sedimento del transporte litoral no son las más apropiadas para nuestro objetivo de ampliar la franja de playas y proteger la línea de costa del sector.

8.3.5.3 Modelación de espolones como estructuras de retención de rellenos.

Considerando las características del sector analizado hasta el momento, sobre todo la ineficacia de los espolones por si solos para aumentar el ancho de las playas evaluamos como alternativa de modelación un relleno entre la abscisa 0 y la 975 de 30 metros, entre la 975 y la 1.850 de 60 metros y entre la la 1.850 y la 2.250 de 50 metros. Dichos rellenos estabilizados por unos espolones con la configuración y las características descritas en la Tabla No 30 y la Figura No 68.

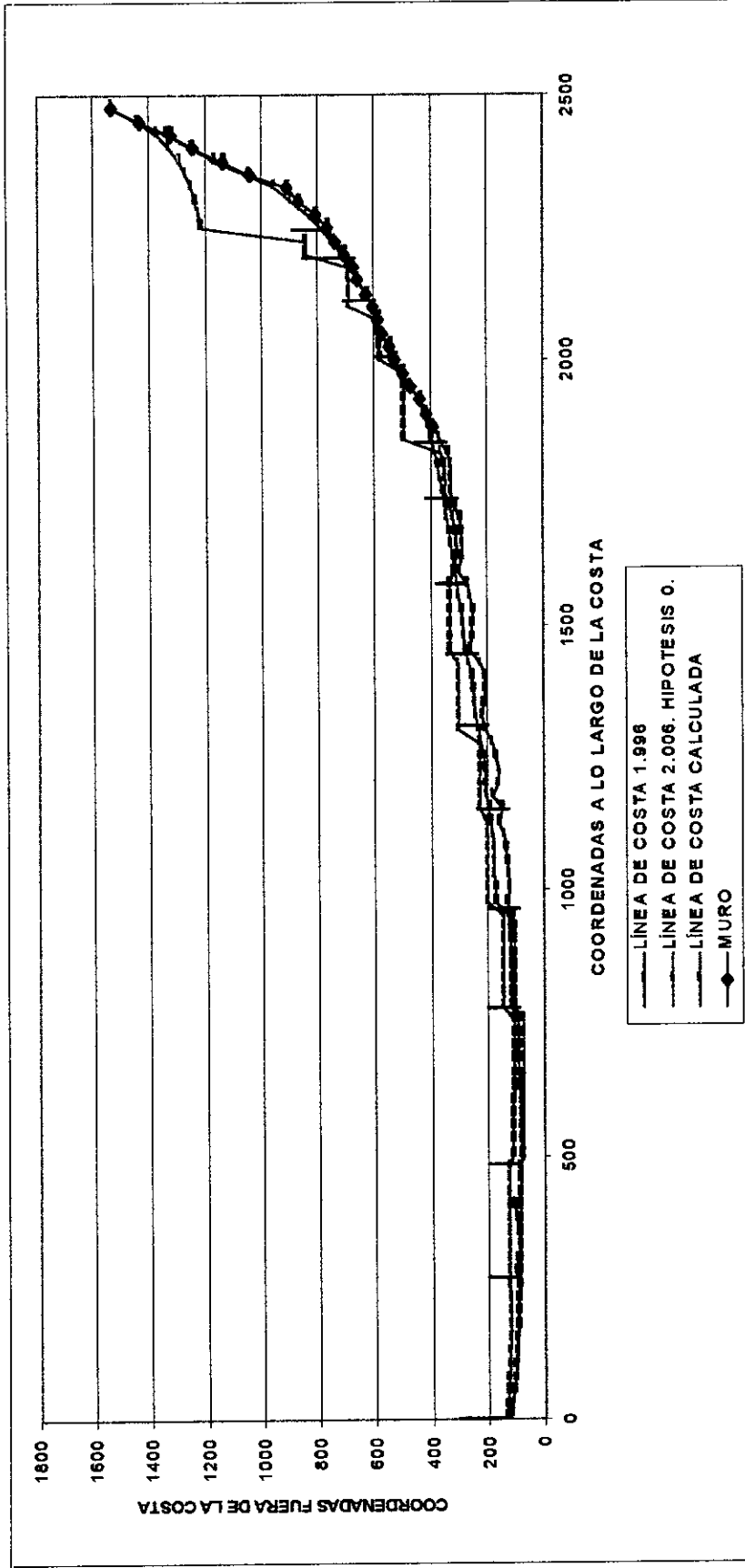
TABLA N° 30. CONFIGURACION DE ESTRUCTURAS MODELADAS

| Estructura | Ubicación | Características |
|-------------------|---|---|
| Espolón Iribarren | Extremo sur de la Península de Bocagrande. Celda 1, abscisa 0. | Llega a la cota -2.75 mts, con 156 mts de longitud desde la orilla. |
| Espolón E1 | Frente al Hotel Caribe. Celda 11, abscisa 250. | Llega a la cota -2.0 mts. |
| Espolón E2 | Entre la Calle 4ª y la Calle 5ª. Celda 21, abscisa 500 | Llega a la cota -1.5 mts |
| Espolón E3 | Frente a la Calle 6ª. Celda 32, abscisa 775. | Llega a la cota -1.0 mts. |
| Espolón E4 | Frente a la Calle 7ª. Celda 40, abscisa 975 | Llega a la cota -1.0 mts |
| Espolón E5' | Frente a la Calle 8ª. Celda 47, abscisa 1.150. | Llega a la cota -1.0 mt. |
| Espolón E6' | Entre la Calle 8ª y la 9ª. Celda 53, abscisa 1.300 | Llega a la cota -1.0 mt |
| Espolón E7' | Entre la Calle 9ª y la 10ª. Celda 59, abscisa 1.450 | Llega a la cota -1.0 mt |

| Estructura | Ubicación | Características |
|-------------|--|--------------------------------|
| Espolón E8' | Sobre la Calle 10ª. Celda 65, abscisa 1.600 | Llega sobre la cota -0.63 mts. |
| Espolón E9' | Sobre la Calle 11°. Celda 70, abscisa 1.725 | Llega sobre la cota -0.64 mts. |
| Muro | Entre la Calle 11° y el Sector el Limbo. Celda 76 a100. Abscisa 1.875 a 2.475. | Muro con borde sobre el agua |
| Espolón E5 | Entre la Calle 11° y la 12°. Celda 75, abscisa 1.850. | Llega a la cota -0.73 metros. |
| Espolón E6 | Entre la Calle 12° y la 13°. Celda 81, abscisa 2.000 | Llega a la cota -0.61 mts. |
| Espolón E7 | Entre la Calle 13° y 14°. Celda 85, abscisa 2.100 | Llega a la cota -1.4 metros |
| Espolón E8 | Entre la Calle 14° y 15°. Celda 89, abscisa 2.200 | Llega a la cota -1.0 mts |
| Espolón E9 | Al final del sector el Limbo. Celda 91, abscisa 2.250 | Llega a la cota -1.6 mts |

FIGURA No 68. MODELACION DE ALTERNATIVAS DE SOLUCION
RELLENOS Y ESTRUCTURAS DE RETENCION

242.



Los resultados de modelación nos indican que esta alternativa es capaz de brindar a largo plazo un ancho de playas con las especificaciones requeridas, es decir al menos 15 metros adicionales a la línea de costa utilizada como inicial (línea de costa de 1.996).

En el primer tramo rellenado (es decir entre las abscisas 0 y 975) se presentaron retrocesos máximos de 10 metros, en el segundo tramo (es decir entre las abscisas 975 y 1.850) se presentaron los retrocesos máximos entre las abscisas 1.725 y 1.825 debido al fuerte cambio de dirección que allí experimenta la línea de costa. En el tercer tramo se presentaron retrocesos máximos de 15 metros.

Concluimos que en líneas generales esta alternativa provee una solución técnicamente viable al problema de la ampliación y conservación de la franja de playas

9. CONCLUSIONES

1. Con respecto al primer objetivo específico de este trabajo de tesis, en cuanto a la evolución de la línea de costa de Bocagrande en el tramo comprendido entre el Espolón Iribarren y el Sector El Limbo en los aspectos de variación topobatimétrica y sedimentológica concluimos:

1.1 En la zona los valores de D50 están entre 0.11 mm y 0.23 mm y los de D90 tienen un rango de 0.17 a 0.8.

El valor promedio de D50 para el sector fue fijado en 0.142 mm, el D90 promedio correspondió al valor 0.318 mm y el porcentaje medio Pasa 200 fue 1.72%.

Los anteriores resultados en líneas generales están de acuerdo con el estudio “Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y El Laguito” de 1.989 del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos en el que se precisa: “las playas de Bocagrande, están compuestas por arenas finas cuyo D50 es en promedio 0.15 mm”.

1.2 A nivel de distribución espacial del sedimento es interesante en cuanto al D50 la abundancia de valores entre 0.12 mm y 0.13 mm en el sector comprendido entre la Calle 6° y el Espolón Iribarren . Este sector en el año de 1.991 fue rellenado con arenas dragadas del sector El Laguito en donde el D50 promedio es de 0.12 mm.

Es también interesante resaltar que a lo largo de toda la zona los valores de D50 más altos tienden a agruparse en la línea de costa sobre la parte seca de la berma, ya que el valor de D50 promediado solo sobre las muestras de la línea de costa asciende a 0.17 mm, resultando ser mayor que el D50 promediado sobre todas las muestras que son de 0.142 mm.

1.3 En cuanto a variación de las características topobatimétricas la evolución del sector ha sido en general tendiente a la estabilidad y la acresión, y los procesos erosivos que se presentaron después del paso del huracán Joan entre el espolón Iribarren y el Hotel Caribe fueron contrarrestados por el relleno dispuesto en esa zona entre 1.990 y 1.991. Específicamente entre el Hotel Capilla del Mar y el Sector el Limbo, donde solo actuó la dinámica natural en los años de análisis podemos constatar la escasa variación que ha tenido la zona.

2. Con respecto a el segundo objetivo de este trabajo de tesis, en cuanto a conocer con una buena aproximación los fenómenos de refracción, reflexión, difracción y rotura de oleaje en el sector, podemos concluir lo siguiente:

2.1 En cuanto a condiciones de oleaje mar afuera de acuerdo a la estadística del G.W.S sistematizada por nosotros:

Las alturas de 1 metro son sobrepasadas 88.1 % del tiempo, la de 2 metros el 48.45% del tiempo, la de 3 metros un 17.58% y la de 5 metros solo un 1.5 % del tiempo, la ola de altura 8 metros es sobrepasada solo un 0.099%.

En cuanto a periodos el de 4 seg es superado un 99 % del tiempo, el de 6 seg el 65.93%, el de 8 seg un 13.98% y el de 9 seg un 4.49%.

En el Mar Caribe la dirección con mayor porcentaje de ocurrencia es la Este con 51.6%, le sigue el NE con 27.73%. De estos dos el más importante por la orientación de nuestra costa es sin duda el oleaje NE. Les siguen en porcentaje de ocurrencia los oleajes SE (9.72%), N(3.79%), NW(1.27%), S(2.15%), NW(1.27%), W(1.01%) y el más bajo corresponde al SW(0.99%).

Hablando específicamente de las características del oleaje NE podemos decir que a lo largo del año dentro de esta dirección la altura de 1 metro es superada un 83.94%, la de 2 metros un 45.6% y la de 8 metros solo en un 0.2 %, en cuanto a periodos el de 5 seg es superado un 86.1% y el de 7 seg un 26.96%, el de 9seg lo es solo en un 2.98%.

2.2 Comparando nuestro análisis de oleaje Mar afuera con relación al hecho en 1.972 por el Laboratorio de Hidráulica de Francia, las diferencias en cuanto a porcentajes de ocurrencia anual de las direcciones de oleaje eran de esperarse, ya que el estudio del LHF corresponde a datos de oleaje generados con una estadística de vientos que se extendió hasta 1.971, los datos del G.W.S al ser más frescos, debían diferir en cuanto a porcentajes de ocurrencia, ya que el clima de oleaje no es estático.

La principal diferencia entre los dos estudios viene marcada por los métodos usados para cada análisis, y el origen de los datos : la correlación de periodos y alturas hecha por el LHF se obtuvo a partir de la aplicación del método de Breischneider sobre datos de viento y la correlación presentada en el presente trabajo fue producto de la aplicación de una regresión estadística tipo exponencial sobre datos de observaciones visuales compiladas dentro de la publicación G.W.S.

Mientras no se hagan mediciones sistemáticas de oleaje en el Mar Caribe tendremos que recurrir a las fuentes y los análisis hasta ahora mencionados, teniendo en cuenta las limitaciones que impone cada tipo de aproximación.

2.3 A nivel de el análisis de la refracción del oleaje entre aguas profundas y la costa concluimos:

Los oleajes NE y N terminan teniendo dirección de propagación en la franja N-NW, al pasar de aguas profundas a intermedias y someras.

La plataforma submarina prácticamente no afecta la propagación del oleaje NW el cual sufre ligeras variaciones de dirección entre mar afuera y la costa. Cosa semejante ocurre con el oleaje W.

Las anteriores transformaciones son coherentes con la fenomenología inherente a los fenómenos de refracción, ya que la dirección de las curvas batimétricas es en general SW-NE en la zona de estudio y una configuración batimétrica de este tipo solo puede oponer resistencia a los oleajes del sector NE-N transformándolos, dejando pasar con leves variaciones a los del sector W y NW.

Nuestras conclusiones en cuanto a oleaje son en general coherentes con los análisis de oleaje precedentes en el litoral colombiano.

En cuanto a la retura de las olas considerado la muestra total de oleaje de nuestro análisis (Oleaje del sector NE hasta el W) el 74.56% del oleaje rompe entre la cota -2.0 mts y la orilla y el 49.69% entre la cota -1.0 mts y la orilla.

3. En cuanto al tercer objetivo de este trabajo de tesis : “Conocer la tendencia los procesos de transporte de sedimentos de la zona” concluimos:

A nivel global la evolución del sector entre 1.988 y 1.996 estuvo orientada hacia la estabilidad, sin mayor avance en líneas generales de la línea de costa por procesos naturales, presentándose acumulación de sedimento en el sector Sur por los rellenos hechos en 1.991 y escasa acumulación en el sector Norte, a pesar de las estructuras presentes. Esta tendencia puede explicarse por la intervención que ha sufrido el litoral de Cartagena de Indias desde el Sector de Crespo y Marbella en adelante (y localmente por las estructuras aguas arriba del Sector el Limbo) lo cual a nivel global ha redundado en una disminución en los volúmenes de acresión de el sector de Bocagrande.

Concluimos por todos estos datos que el nivel de transporte presente en estos momentos no es lo suficientemente alto como para plantear soluciones de estabilización que estén fundamentadas en la intersección del sedimento circulante

4. Con respecto al cuarto objetivo de este trabajo de tesis: "Evaluar alternativas de protección y estabilización de la línea de costa para proteger el recurso turístico y paisajístico que las playas representan, contribuyéndose además al resguardo de la Avenida Primera de Bocagrande cuyo trazado actual es amenazado por los mares de leva de cada año y será muy posiblemente ampliada de 2 a 4 carriles dentro del futuro ordenamiento vial de la ciudad" podemos concluir lo siguiente:

A partir del análisis de las tendencias de transporte litoral y variación en la línea de costa, así como del análisis de alternativas a través de la modelación matemática con GENESIS se puede concluir que las alternativas de protección, ampliación y estabilización de las playas deben tener como elemento básico unos rellenos con o sin estructuras de retención. Estas soluciones descritas en detalle en nuestro análisis de alternativas proveen una salida viable técnicamente para obtener una configuración de línea de costa apta para poder ampliar sin problemas la Avenida Primera de Bocagrande sin perjuicio para la actual franja de playas.

Nuestro análisis de alternativas también nos permite concluir que las soluciones basadas en la intersección del transporte litoral a través de espolones no son capaces de proveer el espacio necesario para la ampliación de la vía y asegurar la estabilidad de la línea de costa resultante, ya que generan procesos erosivos en varios sectores siendo en general contraproducente para la dinámica del sector.

BIBLIOGRAFIA

CABELLOS BARREIRO, Enrique. Cartagena de Indias Mágica Acropolis de América
1.992. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y CEDEX, 1.992.

COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. Shore Protection Manual. Vol I y II.
Department of the Army. US Army Corps of Engineers, 1.984.

ECO ,Umberto. Como se hace una tesis. Ariola editores, 1.993.

FRÍAS V, Armando y MORENO C, Gonzalo. Ingeniería de Costas. Editorial Limusa, S.A ,
1.988.

GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, Mauricio y MEDINA SANTAMARÍA, Raúl. Curso
Internacional de Morfodinámica de Playas. Memorias. Grupo de Ingeniería Oceanográfica
y de Costas. Universidad de Cantabria,1.996.

GRAVENS, Mark B; HANSON, Hans and KRAUS, Nicholas. Génesis: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Report 2. Workbook and System User's Manual. Department of the Army. US Army Corps of Engineers, 1.991.

GRAVENS, Mark B. User's Guide to the Shoreline Modeling System (S.M.S). Department of the Army. US Army Corps of Engineers, 1.992.

GRAVENS, Mark . Wave Resolution effects on predicted Shoreline Positions. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering Vol 123, 1.997.

HANSON, Hans and KRAUS, Nicholas. Génesis: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Report 1. Technical Reference. Department of the Army. US Army Corps of Engineers, 1.989.

LABORATORIO CENTRAL DE HIDRÁULICA DE FRANCIA. Estudio de Playas en la Bahía de Cartagena. Informe General presentado al Ministerio de Obras Publicas y Transportes, 1.972.

LABORATORIO DE ENSAYOS HIDRAULICOS. BUQUE EXPLORADOR. HIDROESTUDIOS S.A . Análisis de la evolución de las playas de Bocagrande y El Laguito. Informe presentado al Ministerio de Obras Publicas y Transportes, 1.989.

LABORATORIO DE ENSAYOS HIDRAULICOS. Recuperación de las Playas de Bocagrande en Cartagena. Informe presentado al Ministerio de Obras Publicas y Transportes, 1.983.

VERHAGEN, H.J. Coastline Management (Lectures Notes). I.H.E Delft. Delft, 1.996.