

PROCESAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE REGISTROS OBTENIDOS POR EL
SONAR DE BARRIDO LATERAL (SSS) APLICADO A CARTOGRAFIA
ACUSTICA SUBMARINA

JHON ALEXANDER AHUMADA MARTINEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA

POPAYÁN

2014

PROCESAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE REGISTROS OBTENIDOS POR EL
SONAR DE BARRIDO LATERAL (SSS) APLICADO A CARTOGRAFIA
ACÚSTICA SUBMARINA

Enmarcado en el proyecto:

“ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS PROCESOS EROSIVOS EN LA COSTA
CONTINENTAL E INSULAR DEL CARIBE COLOMBIANO”

PROGRAMA DE GEOCIENCIAS MARINAS, INVEMAR.

JHON ALEXANDER AHUMADA MARTINEZ

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Físico

Director

ING. LEONAIRO PENCUE FIERRO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA

POPAYÁN

2014

Nota de aceptación

Ing. Edgar Leonairo Pencue Fierro
Director

MSc. Carolina Castrillón Ojeda
Evaluadora

Ing. Luz Adriana Plazas Pemberthy
Evaluadora

Fecha de sustentación: Popayán, 25 de abril de 2014

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	8
1. CARTOGRAFIA SUBMARINA	9
1.1. CARTOGRAFIA ACUSTICA SUBMARINA.....	10
1.2. INVEMAR y el proyecto PNNCRSB	12

2.	HIDROACÚSTICA.....	13
2.1.	Propagación y velocidad del sonido en el agua	13
2.2.	Absorción	14
2.3.	Reflexión y Dispersión	14
2.4.	Interacción del sonido con la columna de agua.	15
2.5.	Interacción del sonido con el fondo marino.....	15
3.	EL SONAR DE BARRIDO LATERAL (SSS)	16
3.1.	Resolución y distorsión.....	18
3.2.	Retrodispersión y sombra acústica.	20
3.3.	Zona ciega nadir.	21
3.4.	Características del SSS de INVEMAR.....	22
4.	PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES ACUSTICAS	23
4.2.	Adquisición y pre procesamiento de las imágenes.	24
4.3.	Método de reconstrucción de nadir.	26
4.4.	Las texturas en las imágenes acústicas.	27
4.5.	Filtro de Gabor.	28
4.5.1.	Segmentación con filtros de Gabor.....	29
4.6.	Clasificación digital de imágenes.....	31
4.6.1.	Redes Neuronales.....	31
4.6.2.	Sistema experto.....	33
5.	RESULTADOS.....	34
5.1	Imágenes acústicas marinas obtenidas con el SSS.	35
5.2.	Características de los sustratos presentes en las imágenes acústicas.....	36
5.3.	Supresión del nadir.....	39
5.4.	Segmentación de texturas con filtros de Gabor.....	40
5.5.	CLASIFICACIÓN DE SUSTRATOS MARINOS.	42
5.5.1.	Extracción de características.....	44
5.5.2	Sistema de clasificación a partir de la red neuronal.	47
6.	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO	50
6.1.	Zona 1: Entre Isla Grande e Isla Tesoro.....	50
6.2.	Zona 2: Suroccidente de Isla Rosario	54
6.3.	Zona 3: Sur de Isla Arena	56

6.4. Evaluación del desempeño mediante simulación.	64
7. CONCLUSIONES.....	66
8. TRABAJOS FUTUROS.....	67
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
10. Anexo 1	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagen de la ubicación geográfica de las islas del rosario y los límites del proyecto PNNCRSB, suministrada por INVEMAR.....	13
Figura 2. Perfil de velocidad en la propagación del sonido para aguas poco profundas [4].	15
Figura 3. Representación de algunos parámetros básicos en el entorno del dispositivo [11]......	17
Figura 4. Geometría de los frentes acústicos del SSS [7].	17
Figura 5. Variación de la forma de un objeto respecto a la distancia al SSS [7].	19
Figura 6. Dependencia entre la dispersión del haz y la definición de los objetos presentes en el fondo [12].	20
Figura 7. Imagen acústica de un naufragio, se aprecia la sombra producida por la popa de la goleta [18]......	21
Figura 8. Esquema del funcionamiento del SSS donde se ilustra la zona ciega [18].	22

Figura 9. (izq.)Imagen acústica de un sustrato coralino, (der.) trayectoria de la embarcación (nadir) en color azul. imágenes suministradas por INVEMAR.	22
Figura 10. Fotografía del SES 2000 – Compact de Innomar.	23
Figura 11. (Izquierda) imagen obtenida por el SSS, (derecha) imagen segmentada de los sustratos.	24
Figura 12. Trayectorias del SSS (Azul) sobre las zonas de estudio	25
Figura 13. (Izq.) imagen señalizada con rojo el área a suprimir, (der.)Imagen reconstruida.	27
Figura 14. Características de las imágenes acústicas [26].	28
Figura 15. Parte real (izq) e imaginaria (der) de un filtro de Gabor.....	29
Figura 16. Paralelo de una neurona natural (izquierda) [36] y artificial (derecha) [35].	32
Figura 17. Diagrama de un perceptrón multicapa [33].	32
Figura 18. Localización de las zonas adquiridas con el sonar de barrio lateral dentro del área de estudio, suministrado por INVEMAR.	35
Figura 19. 1. imágenes obtenidas por el SSS, 2. Imagen interpolada, 3. Imagen con ajuste de contraste.....	36
Figura 20. Histograma correspondiente a la imagen Isla Arena.....	38
Figura 21. Histograma correspondiente a la imagen Isla Tesoro (Izq.) e isla del Rosario (der.)38	
Figura 22. (Izq.)Segmento de imagen Isla de Arena, (der.) Máscara de trayectorias e imagen.....	39
Figura 23. (a)Segmento de imagen Isla Arena, (b) reconstrucción en la región a,	40
Figura 24. Segmentación de Isla Tesoro para diferentes parámetros b.	40
Figura 25. Segmentación de texturas en Isla Rosario (Izq.) segmentación de texturas en Isla Tesoro (der.)	41
Figura 26. (Izq.) segmentación de texturas en Isla Arena, (der.) formaciones coralinas dispersas con cambio en la ganancia.	42
Figura 27. Segmentos texturales de Isla Tesoro.....	42
Figura 28. Sustratos presentes en las imágenes acústicas: (1) fondo arenoso, (2) fondos arenosos con fanerógamas (3) fondos coralinos 1, (4) fondos coralinos 2, (5) fondos coralinos medianamente dispersos (6) fondos coralinos muy dispersos.	43
Figura 29. Mapas de profundidad en: 1.islas de arena, 2. islas del rosrio, 3. Isla del Tesoro.	44
Figura 30. Espacio de características S-E-L de los sustratos marinos más representativos en las imágenes acústicas.	45
Figura 31. Espacio de características P-E-L de los sustratos marinos más representativos en las imágenes acústicas.	46
Figura 32. Matriz de extracción.....	47
Figura 33. Configuración de la RNA.....	48
Figura 34. Curva de rendimiento en la RNA	48
Figura 35. Resultado de la clasificación en Isla Rosario.....	49
Figura 36. Segmentación de fondos en Isla Tesoro.	51

Figura 37. A) Apariencia del fondo de la terraza arrecifal y B) zona de depresión continúa con parche arenoso profundo, fotografías suministradas por INVEMAR.....	52
Figura 38. A) Pared de la terraza arrecifal con pendiente suave y B) mosaico estructural del borde Norte de la terraza arrecifal, fotografías suministradas por INVEMAR.....	53
Figura 39. A) Planicie angosta que bordea la pared del cono y B) borde superficial del cono, fotografías suministradas por INVEMAR.	54
Figura 40. A) Pared del cono arrecifal con pendiente pronunciada y B) Planicie interna del cono con parches discontinuos de arena, fotografías suministradas por INVEMAR.	54
Figura 41. Segmentación de fondos en Isla Rosario.....	55
Figura 42. Segmentación de fondos en Isla Arena.....	57
Figura 43. Praderas semicontinuas de pastos marinos de las especies <i>Thalassia testudinum</i> y <i>Syringodium</i> filiforme sobre sustrato de origen bioclástico, fotografías suministradas por INVEMAR. Figura 44. A) Bloque de coral muerto colonizado por variedad de esponjas e invertebrados y B) Coral masivo del género <i>Siderastrea</i> en condiciones regulares, fotografías suministradas por INVEMAR.	58
Figura 45. A) Mosaicos de formaciones arrecifales en la zona y B) Vista superior de la zona arrecifal y de parches de material bioclástico, fotografías suministradas por INVEMAR.	59
Figura 46. A) Agregación de corales, algas y esponjas y B) Pared irregular colonizada por corales y esponjas, fotografías suministradas por INVEMAR.....	60
Figura 47. A) Agregación de corales, algas y esponjas y B) Pared irregular colonizada por corales y esponjas, fotografías suministradas por INVEMAR.....	60
Figura 48. A) Sustrato arenoso bioclástico modificado por organismos bioturbadores bentónicos y B) Estructuras coralinas rodeadas de parches arenosos pequeños, fotografías suministradas por INVEMAR.	60
Figura 49. A) Bloques dispersos de esqueletos de coral sobre los cuales se encuentran colonias de esponjas, algas, gorgonáceos y corales varios y B) Presencia y aumento de bloques de coral variados, fotografías suministradas por INVEMAR.	61
Figura 50. Terraza con restos de coral muerto y cascajo colonizado por algas, esponjas y corales de pequeño tamaño, fotografías suministradas por INVEMAR.	62
Figura 51. Terraza con restos de coral muerto y cascajo colonizado por algas, esponjas y corales de pequeño tamaño, fotografías suministradas por INVEMAR.	62
Figura 52. Terraza con restos de coral muerto y cascajo colonizado por algas y esponjas, con presencia de algunos colares vivos, fotografías suministradas por INVEMAR.	63
Figura 53. Plataforma arrecifal somera, compuesta principalmente de colonias diversas de coral vivo asociadas con gorgonáceos y esponjas foliáceas y tubulares, fotografías suministradas por INVEMAR.....	63
Figura 54. Terraza arrecifal con crecimiento masivo de corales combinados con mosaicos de esponjas y algas, fotografías suministradas por INVEMAR.	64
Figura 55. Segmentos de toma de muestras para comprobación.....	65
Figura 56. Etapas de procesamiento en el mosaico Isla Arena.....	71
Figura 57. Etapas de procesamiento en el mosaico Isla Rosario.....	72
Figura 58. Etapas de procesamiento en el mosaico Isla Tesoro.....	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Métodos más apropiados para las distintas escalas y resoluciones.....	12
Tabla 2. Especificaciones técnicas SES 2000 – Compact de Innomar.....	23
Tabla 3. Área correspondiente a las zonas escaneadas con el SSS.....	35
Tabla 4. Extensión de los sustratos interpretados en la zona1.....	49
Tabla 5. Extensión de los sustratos interpretados en la zona 2.....	54
Tabla 6. Extensión de los sustratos interpretados en la zona 3.....	55
Tabla 7. Resultados del sistema experto para las 5 clases.....	71

INTRODUCCIÓN

El Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis” -INVEMAR- es el encargado principal de la investigación ambiental básica y aplicada de los recursos naturales renovables y del medio ambiente y los ecosistemas costeros y oceánicos de los mares adyacentes al territorio nacional. INVEMAR cuenta con un dispositivo llamado escáner de barrido lateral (SSS por sus siglas en inglés, *side scan sonar*) capaz de generar imágenes acústicas que junto con unas muestras del fondo marino permite identificar las diferencias en el material y las texturas de los distintos tipos sustratos presentes en la zona de análisis con el fin de realizar una caracterización geológica y geomorfológica de las zonas de estudio.

Como parte de los objetivos de este trabajo, se obtienen e interpretan las imágenes tomadas por el dispositivo SSS de los escaneos realizados en los corales de Isla del Rosario y San Bernardo, posteriormente se segmentaran las diferentes imágenes acústicas, por medio de las distintas texturas presentes en los mosaicos y un mapa de profundidades de la zona, finalmente se validarán los diferentes resultados con ayuda de un experto y muestras tomadas in situ, para determinar el desempeño de la plataforma y a su vez realizar correcciones de ser pertinentes.

Este documento se ha estructurado de la siguiente manera: en el capítulo 1 se expone la información requerida para entender los conceptos de cartografía submarina y los distintos sustratos presentes alrededor de las islas del Rosario, además se describe brevemente las contribuciones de este trabajo en el proyecto que actualmente está realizando INVEMAR.

En el capítulo 2 se presenta una descripción teórica de los conceptos físicos necesarios para entender la interacción de las ondas sonoras con la columna de agua y también los distintos fondos marinos.

En el capítulo 3 se describe los componentes y la funcionalidad del dispositivo usado para la adquisición de imágenes acústicas submarinas que se implementó en las inmediaciones de islas del Rosario y San Bernardo (Cartagena-Colombia).

En el capítulo 4 se aborda los temas relacionados con el procesamiento de imágenes acústicas, haciendo énfasis en el método usado para la clasificación de los distintos sustratos marinos y finalmente en el capítulo 5 se presentan los resultados de la implementación del algoritmo desarrollado como una herramienta de asistencia donde se compara y se valida con fotografías y muestras in situ.

1. CARTOGRAFIA SUBMARINA

Desde mediados del siglo XIX, navieros y oceanógrafos han intentado mejorar sus conocimientos sobre orografía y naturaleza de los sustratos marinos. En la actualidad, el estudio de la morfología del fondo marino es de gran interés en diversos campos de la ciencia y la tecnología, como a nivel industrial. Esto hace que se hayan realizado, y se sigan realizando numerosos experimentos en el campo de la geofísica, geoquímica y biología relacionados con el estudio de este medio, cuyos resultados y análisis son de gran ayuda para otros campos entre los que se encuentra la ingeniería [1].

A partir de la primera carta batimétrica desarrollada por Heezen y Tharp en 1965 y el desarrollo de nuevas tecnologías tanto en la medición como el posicionamiento (GPS o DGPS) se ha logrado una calidad resolución próxima al centímetro, donde estas características varían según las necesidades de cada campo en concreto, por ejemplo una cartografía para gasoducto requiere resoluciones de 1:2500 mientras que para estudios de transporte son aceptables las escalas 1:100000 a 1:1350000, unido a esto se encuentran los nuevos equipos informáticos con los que se ha permitido interpretar de manera más atractiva y de fácil comprensión los fondos marinos[2].

El conocimiento de los fondos marinos lleva al desarrollo de múltiples aplicaciones, por ejemplo en obras de ingeniería, el desarrollo de obras portuarias, emplazamientos de los rompeolas, simulación y predicción de movimientos de agua en zonas de interés, tendidos de líneas subacuáticas como líneas eléctricas y ópticas, conductos de gasoductos y oleoductos, prospecciones petrolíferas, navegación y posicionamiento de equipos ROV (*remote operated vehicle* por sus siglas en inglés), optimización de transportes navales, entre muchas otras aplicaciones [2].

Uno de los métodos para producir un mapa del fondo marino es la batimetría que se basa en la respuesta acústica del medio, donde se tiene en cuenta parámetros como la profundidad y la posición a partir de las isobatas, esto se hace con el fin de determinar la composición y naturaleza del fondo, ya sea rocoso, arena, arrecife, pastos marinos, fallas geológicas, etc. [2].

1.1. CARTOGRAFIA ACUSTICA SUBMARINA

La cartografía acústica submarina se basa en la implementación de dispositivos que usan principios de la hidroacústica, (este concepto físico se explicara en el siguiente capítulo). A continuación se mencionan los instrumentos más comunes usados para el escaneo de los fondos marinos [3]:

- Sondas monohaz: estos dispositivos emiten una sola frecuencia, típicamente 200 KHz, por encima del sonido audible por el ser humano (ultrasónicos). En trabajos de cartografía ya no se emplean, pero por su facilidad de manejo y fiabilidad hasta los 1000 metros se emplean aun en localización de bancos de peces.

- Sondas topas: este dispositivo es útil cuando se trabaja en aguas profundas o se necesita mucha penetración, ya que es necesario transmitir más energía, el perfilador de fondos TOPAS está diseñado alrededor de una antena paramétrica, utilizando las características no lineales de propagación del medio que permiten la generación de señales de baja frecuencia utilizando un pulso de muy corta duración de una señal de alta frecuencia.
- Escáner de barrio lateral (SSS): este dispositivo genera ondas acústicas para explorar la superficie marina a partir de la reconstrucción de las ondas que revotan de los distintos sustratos marinos, debido a que este sistema se usó para el desarrollo del trabajo de investigación, se explicara su funcionamiento en el capítulo 3.

Para la exploración de las distintas zonas, estas técnicas y métodos de cartografía submarina son tan variados y tan complejos como los utilizados en cartografía y topografía terrestre. La evolución de estos estudios y sus resultados van parejos a la evolución de la tecnología, movida por tres motores básicos: el económico, centrado en la búsqueda de yacimientos submarinos minerales y de petróleo, la defensa nacional impulsada por las guerras mundiales y el ambiental con el monitoreo de la erosión y la sedimentación producidos de manera natural o por el impacto humano.

El entorno marino se divide en tres zonas muy distintas entre sí, en cuanto a características del fondo y tecnología necesaria para analizarla:

- Litoral: con una profundidad menor a los 20 metros son las zonas que suelen verse afectadas por la acción de las corrientes, la erosión, el transporte y depósito de sedimentos, y la actividad humana como la contaminación y la construcción de estructuras.
- Márgenes costeras: comprendidas entre los 50 y 500 metros de profundidad, en esta zona se presenta el mayor proceso de sedimentación. Es el área de mayor interés para el seguimiento de cambios a nivel del mar, terremotos, emanación de gases, inestabilidad de capas terrestres, corrientes, etc. Además, es la zona en la se estudia la mayor parte de las actividades de interés para la industria, como por ejemplo las prospecciones petrolíferas.
- Corteza oceánica: es la zona de la litosfera que comprende los fondos marinos más profundos, y en los que la corteza terrestre no suele superar los 10Km.

Los entornos en los que se desarrollaron los escaneos del fondo marino para el presente trabajo, corresponden a la zona litoral y márgenes costeras.

El medio marino presenta numerosos parámetros que limitan la cartografía de los fondos marinos, como las distintas propiedades del agua y la variabilidad de las mismas en función de la profundidad, posición, corrientes, entre otros aspectos, solo se ha logrado un poco más del 10% de los fondos marinos cartografiados a detalle [2].

A continuación se ilustra el método más adecuado en función de la resolución para la elaboración de la cartografía submarina.

Método	Rango	Resolución
Satélites, altimetría	Escala global	2500m
Sonda multihaz, medidor sísmico multicanal	Regional(1Mm)	100m
Sidescan sonar, medidor sísmico de alta resolución	Local(10-100Km)	10m
Medidor sísmico de muy alta resolución, sumergible	Local (1-10Km)	1m
ROV, sonda de experimentación "in situ"	Estación (<1Km)	0,01m

Tabla1: métodos más apropiados para las distintas escalas y resoluciones [2].

1.2. INVEMAR y el proyecto PNNCRSB

El instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “ José Benito Vives De Andreis” (INVEMAR) es un instituto encargado de la investigación básica y aplicada de los recursos naturales renovables y del medio ambiente en los litorales y ecosistemas marinos y oceánicos colombianos, actualmente está desarrollando el proyecto BPIN “Programa de Prevención y Propuestas de Mitigación de la Erosión Costera en Colombia”, cuyo objeto es determinar las causas de la erosión y/o sedimentación que permitan proponer medidas para prevenir o contrarrestar sus efectos. Para el año 2012 se escogió la zona del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo (PNNCRSB), donde se estudiaron sus características geológicas, geomorfológicas y oceanográficas con el fin de contribuir al conocimiento de los procesos que llevaron al origen y evolución de las islas, y su relación con los procesos de erosión y sedimentación pasados y actuales.

La fuente de información para el desarrollo del trabajo de grado fue suministrada por el Programa Geociencias Marinas de INVEMAR quienes colectaron la información en el marco del proyecto: CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA Y OCEANOGRÁFICA DEL PARQUE NACIONAL NATURAL CORALES DEL ROSARIO Y SAN BERNARDO (PNNCRSB), CARIBE COLOMBIANO, CON ÉNFASIS EN LOS PROCESOS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN. A continuación se ilustra la ubicación geográfica de la zona de investigación donde se destaca el área del PNNCRSB y los diferentes sustratos presentes en esa zona (figura 1).

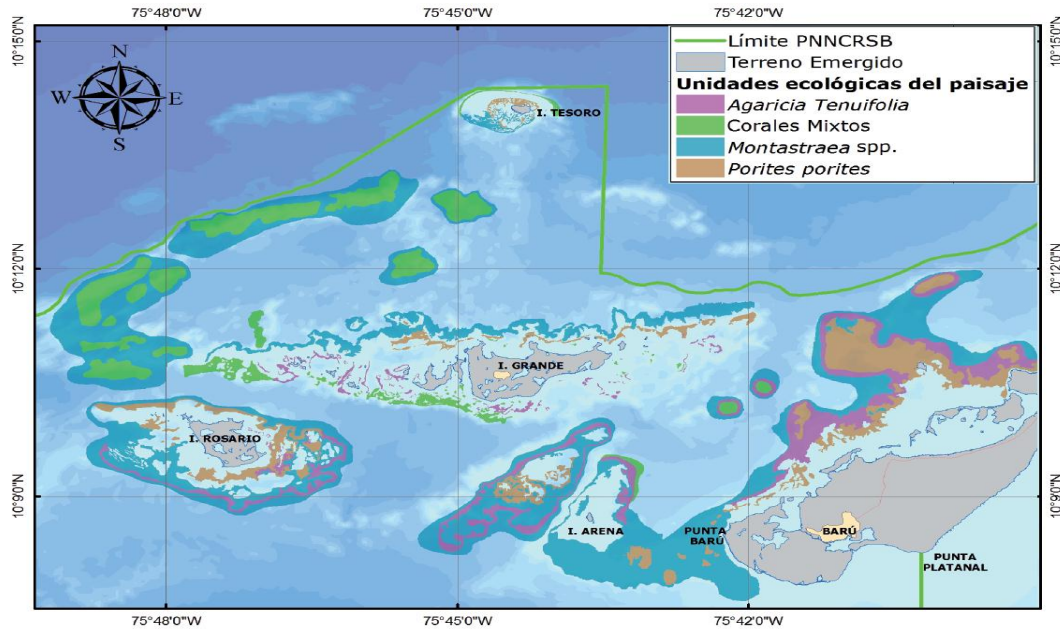


Figura 1. Imagen de la ubicación geografía de las islas del rosario y los límites del proyecto PNNCRSB, suministrada por INVEMAR.

2. HIDROACÚSTICA

En el capítulo anterior se observó que uno de los métodos más usados en la cartografía submarina era aquel que involucraba el uso de dispositivos basados en hidroacústica, es decir en el estudio de la propagación del sonido en el agua y la interacción con otros medios, ya sean sólidos en la superficie del fondo marino, líquidos como columnas de agua con diferentes propiedades fisicoquímicas o gases provenientes de las fisuras subacuáticas, a continuación se describirá los conceptos básicos para entender el funcionamiento físico del sonar de barrido lateral.

2.1. Propagación y velocidad del sonido en el agua

La propagación de las ondas hidroacústicas consiste en las compresiones y dilataciones de diferenciales de volumen de agua que son medidos como cambios de presión, la dirección de propagación está determinada por los gradientes de velocidad del sonido en el agua y aumento de la velocidad debido al aumento de la presión en el mar profundo, también se presenta un perfil de velocidades durante la propagación donde las zonas de baja intensidad se llaman "sombras" y las de alta intensidad "cáusticos" [4].

La velocidad del sonido en el agua marina (v_s) expresada en el sistema internacional tiene la siguiente forma:

$$v_s = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016z \quad [a] [5].$$

Donde T es la temperatura, S es la salinidad y z es la presión hidrostática, las variaciones de la velocidad son relativamente pequeñas entre 1450 y 1540 m/s pero estos pequeños cambios afectan significativamente la propagación del sonido en grandes columnas de agua [6], para corregir esas pequeñas variaciones se calibran los instrumentos constantemente con mediciones in situ.

2.2. Absorción

Cuando el sonido se propaga en el agua, parte de la energía acústica se transforma en calor, esta absorción se debe en parte a las fuerzas cizallantes debido a la viscosidad del líquido, es posible medir la combinación de la absorción con la dispersión del sonido en forma de atenuación sonora, [6]. Estos cálculos se obtuvieron de manera empírica en base a un extenso análisis de laboratorio donde los coeficientes de atenuación para el agua de mar en las frecuencias entre 3KHz y 0.5MHz:

$$\beta = 8.68 * 10^3 \left(\frac{SAf_T}{f_T^2 + f^2} + \frac{f^2}{f_t} \right) (1 - 6.54 * 10^{-4}P) \left[\frac{dB}{km} \right] \quad [b]$$

Donde $A = 2.34 * 10^{-6}$, $B = 3.38 * 10^{-6}$, $f_T = 21.9 * 10^6 \frac{1520}{(T+273)}$, y S, Z=P; variables presentadas en la ecuación anterior.

2.3. Reflexión y Dispersión

En la interfaz entre el mar-aire tiene un comportamiento aproximado al reflector perfecto debido a la alta constante de impedancia que hace que la energía capaz de cruzar la frontera sea mínima, considerando altas frecuencias (>1KHz) o cuando se presenta mucha actividad en la superficie marítima, parte del sonido incidente es dispersado, esto se tiene en cuenta mediante un coeficiente de reflexión considerando que la suma entre el coeficiente de absorción y el de reflexión debe ser igual a 1[7], la ecuación de reflexión es descrita como:

$$R = -e^{-2k^2 h^2 \sin^2 A} \quad [c]$$

Donde h es el valor medio de la altura de la ola, k el número de onda y A la amplitud.

2.4. Interacción del sonido con la columna de agua.

La propagación del sonido a través de una columna de agua se ve afectada debido a las corrientes marinas, salinidad, temperatura, la residencia de las olas y la turbulencia a pequeña escala produciendo fluctuaciones espaciales y temporales en la propagación de las ondas, que alteran su medición. [7].

Las imágenes acústicas obtenidas en el PNNCRSB. con las que se desarrolló este trabajo muestreaban profundidades menores a 70 metros, en zonas consideradas poco profundas, ya que están ubicadas por encima de la plataforma continental, debido a esto se puede estimar un perfil típico de propagación de las ondas acústicas como el siguiente diagrama de rayos:

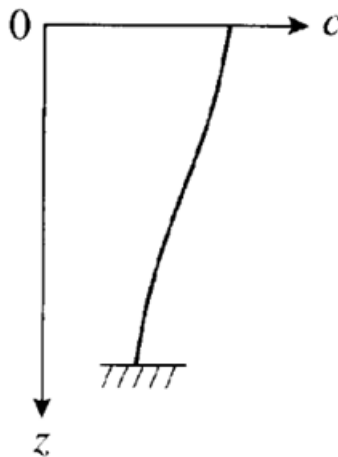


Figura 2. Perfil de velocidad en la propagación del sonido para aguas poco profundas [4].

En la figura anterior se considera el comportamiento de las ondas acústicas durante el verano en donde las capas superiores del agua están bien climatizadas para este caso se observa que cada reflexión en la parte inferior causa una marcada atenuación de las ondas sonoras.

2.5. Interacción del sonido con el fondo marino

El comportamiento de la onda acústica al incidir en el fondo se ve sometida a un cambio de medio de propagación, donde parte de la onda es absorbida por el sustrato marino y otra se regresa a la superficie o es dispersa en la columna de agua.

Considerando la densidad del agua aproximadamente igual a 1, la velocidad de las ondas longitudinales (c) y transversales (b) de las ondas que son absorbidas en el sólido se expresan como [9]:

$$c = \frac{\lambda\mu^{1/2}}{\rho}, \quad b = \frac{\mu^{1/2}}{\rho} \quad [d]$$

Donde ρ_1 es la densidad del sólido, $\lambda = \rho * C^2$ y μ es la constante elástica del sólido.

3. EL SONAR DE BARRIDO LATERAL (SSS)

El sonar de barrido lateral es un dispositivo diseñado para proporcionar imágenes acústicas del fondo marino, el principio general de su funcionamiento consiste en un sensor que escanea la zona de interés, en el SSS se encuentra un emisor que genera ondas sonoras con una frecuencia entre 100 y 500 Khz, estas ondas se propagan a través del agua hasta llegar al fondo marino, en la interacción con el fondo, parte de la energía es reflejada hasta el sensor del dispositivo que recoge la información y reconstruye una imagen acústica [10].

La distancia recorrida desde el transductor hasta el fondo marino se le llama distancia oblicua y a su vez es distinta a la perpendicular entre el sonar y el sustrato, la distancia total escaneada se llama ancho de franja, el ángulo entre la onda transmitida y el fondo se llama ángulo de incidencia y el ángulo *grazing* es la diferencia entre el ángulo normal a la superficie marina con el ángulo de incidencia, mostrado gráficamente en la figura 3.

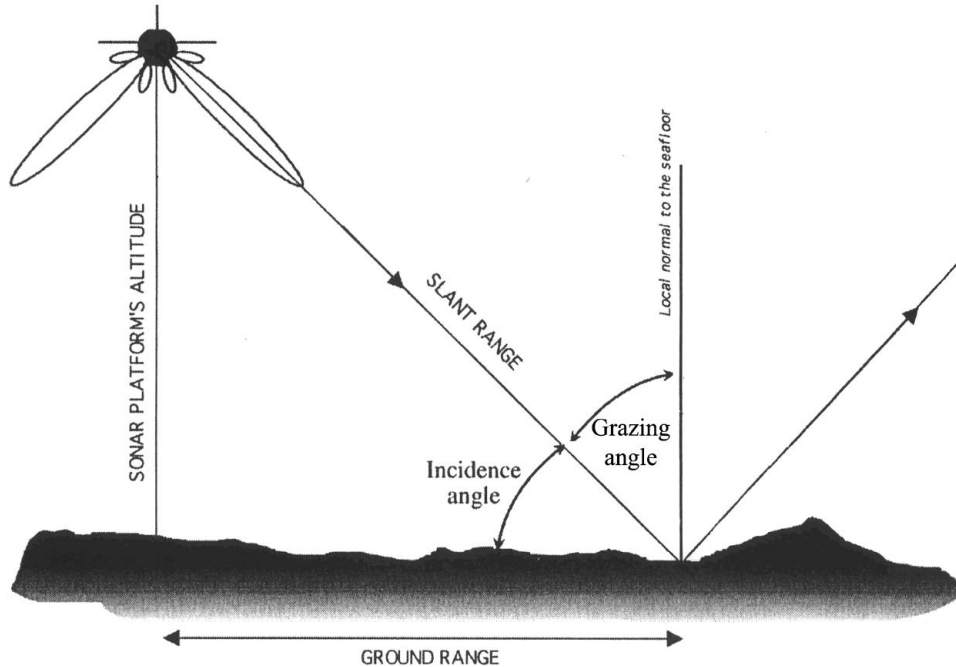


Figura 3. Representación de algunos parámetros básicos en el entorno del dispositivo [11].

Los frentes de onda que genera el SSS son estrechos en el plano paralelo a la dirección de propagación del dispositivo y amplios en el plano perpendicular, con el fin de maximizar la zona de escaneo.

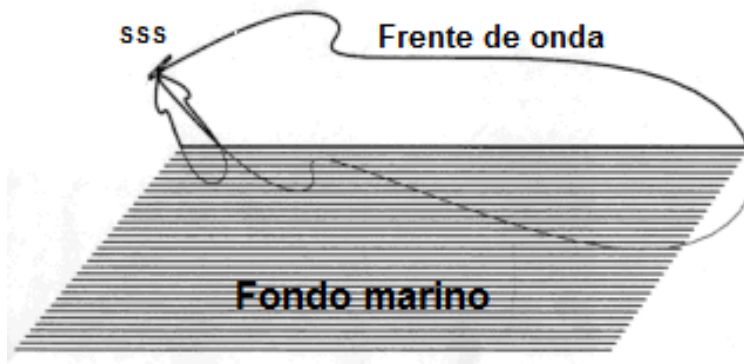


Figura 4. Geometría de los frentes acústicos del SSS [7].

En la figura 4 se observa el ancho de haz largo y estrecho, esta característica además de lograr una imagen nítida del fondo marino también ayuda a rechazar el ruido de fuentes externas, debido a que el sistema se realimenta constantemente con la señal del patrón de las ondas acústicas, previamente establecidas [12].

Los ecos de retorno del fondo marino son recibidos por un transductor que amplifica la señal recogida y después un sistema de adquisición de datos almacena en una matriz digital el registro pixel por pixel al valor correspondiente a la textura del fondo escaneado.

3.1. Resolución y distorsión.

Los pulsos de salida del sonar de barrido lateral tienen una longitud que oscila entre los 0.1 y 0.2 ms para 100KHz y 500KHz respectivamente, donde el espesor del pulso es el producto de la longitud del pulso y la velocidad del sonido en el agua, así un pulso corto tendrá una mejor resolución mientras que un pulso largo sería menos sensible al ruido, lo que resulta de un mejor desempeño de rango [12].

El pulso tridimensional generado, va a interactuar con el fondo marino, donde la región sondeada durante el instante de interacción se llama huella del sonar. El tamaño y la forma de la huella en el fondo marino depende de la distancia que recorre el pulso desde el SSS hasta el sustrato, en la figura 5 se observa que la huella es más larga para sustratos cercanos al SSS debido al ángulo de incidencia. La resolución está relacionada con el seno del ángulo de incidencia entre el sustrato y el vector de propagación del pulso de la siguiente manera [13].

$$\delta y = \frac{c.T}{2*\text{sen}\alpha} \quad [e]$$

Donde c es la velocidad del sonido en el agua y T es la longitud del pulso, al modelar la anterior ecuación se puede observar una distorsión representada en la siguiente figura:

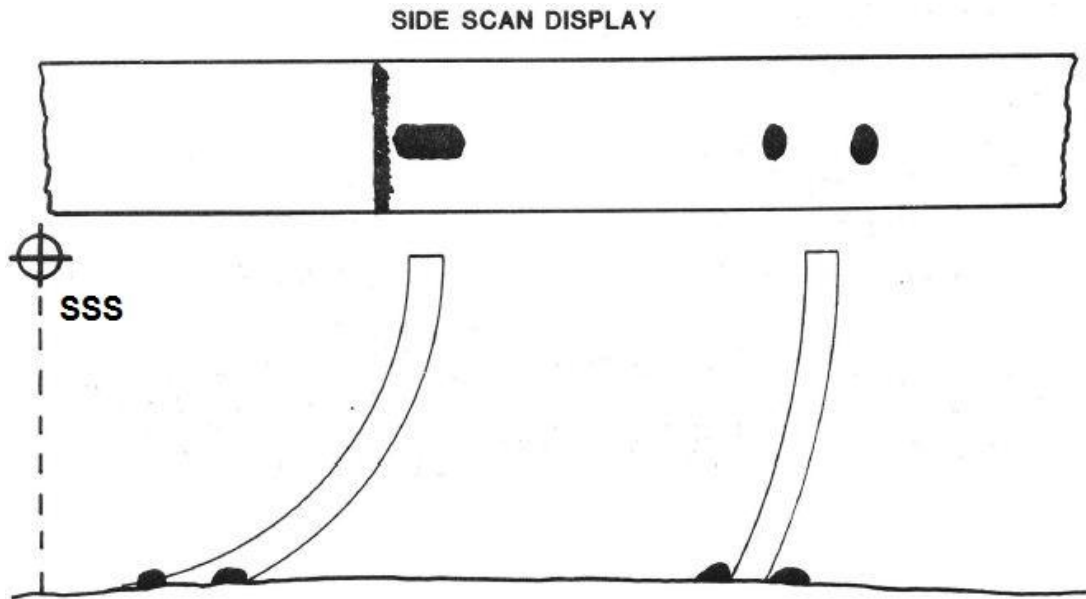


Figura 5. Variación de la forma de un objeto respecto a la distancia al SSS [7].

La siguiente ecuación es solamente la aproximación de lo que realmente ocurre a nivel subacuático, para ángulos muy pequeños cuando $\alpha \rightarrow \infty$, los diferenciales δy que corresponde con la huella del pulso se expresa como:

$$\delta y = \sqrt{h * c * T} \quad [f]$$

Donde h es la distancia entre el SSS y el fondo marino [10].

La resolución está fuertemente ligada a la perpendicularidad del pulso con respecto al generador, ya que el frente de onda aumenta su tamaño de manera proporcional a la distancia desde el SSS hasta la superficie de incidencia, cerca del dispositivo donde la dispersión el haz no es significativa, dos objetos están claramente delineados, como se observa en la figura 6, sin embargo debido a la naturaleza de dispersión de la onda mecánica, cada vez que aumente la distancia entre el pulso y el SSS, el área de escaneo se ensanchará, para este caso dos objetos separados en el fondo marino resultan como un solo objeto en la imagen acústica resultante [13].

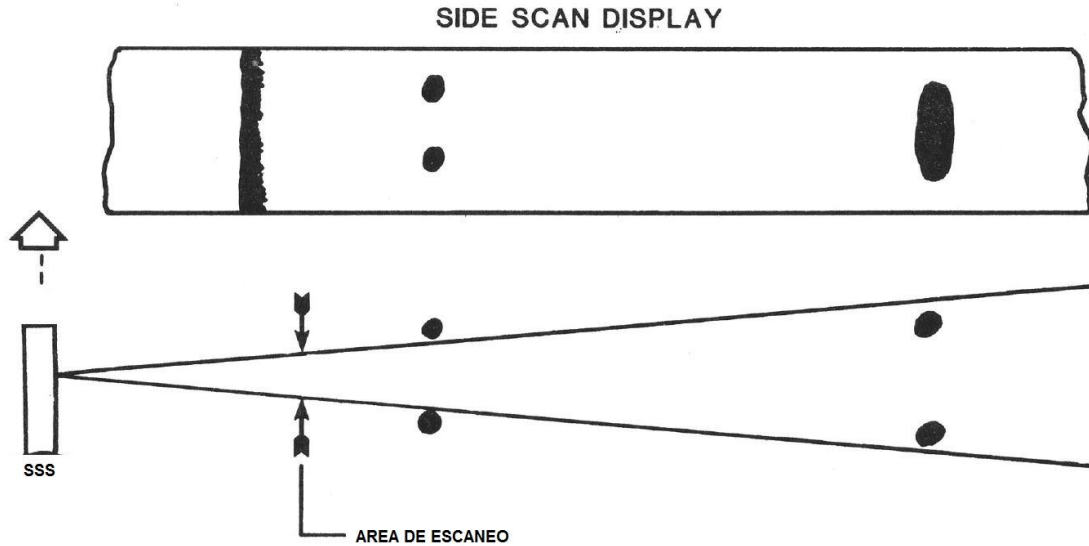


Figura 6. Dependencia entre la dispersión del haz y la definición de los objetos presentes en el fondo [12].

Los datos del sonar de barrido lateral se distorsionan durante su adquisición, esto se debe a la inestabilidad de la embarcación en el que se encuentra el SSS, como también a los cambios en la velocidad de desplazamiento del dispositivo y las variaciones de altura debido a las olas; La distorsión es corregida de manera digital durante la adquisición de datos, mediante una corrección geométrica con ayuda de un dispositivo de posicionamiento global (GPS) [14].

3.2. Retrodispersión y sombra acústica.

La mayor parte de la energía que llega al fondo marino es dispersada en dirección especular, una pequeña porción es absorbida por el sustrato marino y la resultante que es varios ordenes de magnitud más pequeña que la onda incidente se dispersa de nuevo al SSS [15].

La retrodispersión se ve afectada por los siguientes factores:

- La geometría del sustrato marino, es decir, el ángulo de incidencia del pulso con la zona a escanear.

- Las características físicas de la superficie, por ejemplo la rugosidad a micro escala, dureza y textura.
- La naturaleza intrínseca de la superficie (composición, densidad, transmitancia acústica).

En ausencia de grandes variaciones topográficas, en general para sedimentos no consolidados, el tamaño del grano es un factor dominante que afecta la retrodispersión, por ejemplo: los sedimentos gruesos causan una mayor retrodispersión que los elementos finos [16].

Al igual que las imágenes producidas por fotones, en las imágenes acústicas se producen regiones de oscuridad donde el pulso acústico es obstaculizado por un objeto como se observa en la figura 7. Estas regiones se usan para determinar la altura de grandes cuerpos en el fondo marino como barcos, fallas geológicas o estructuras coralinas masivas entre otros [17].



Figura 7. Imagen acústica de un naufragio, se aprecia la sombra producida por la popa de la goleta [18].

3.3. Zona ciega nadir.

Debido al diseño del sonar de barrido lateral, todas las imágenes que se generan con este dispositivo tienen una característica en común y son unas franjas que corresponden con el punto ciego en el momento de escanear el fondo marino [19].

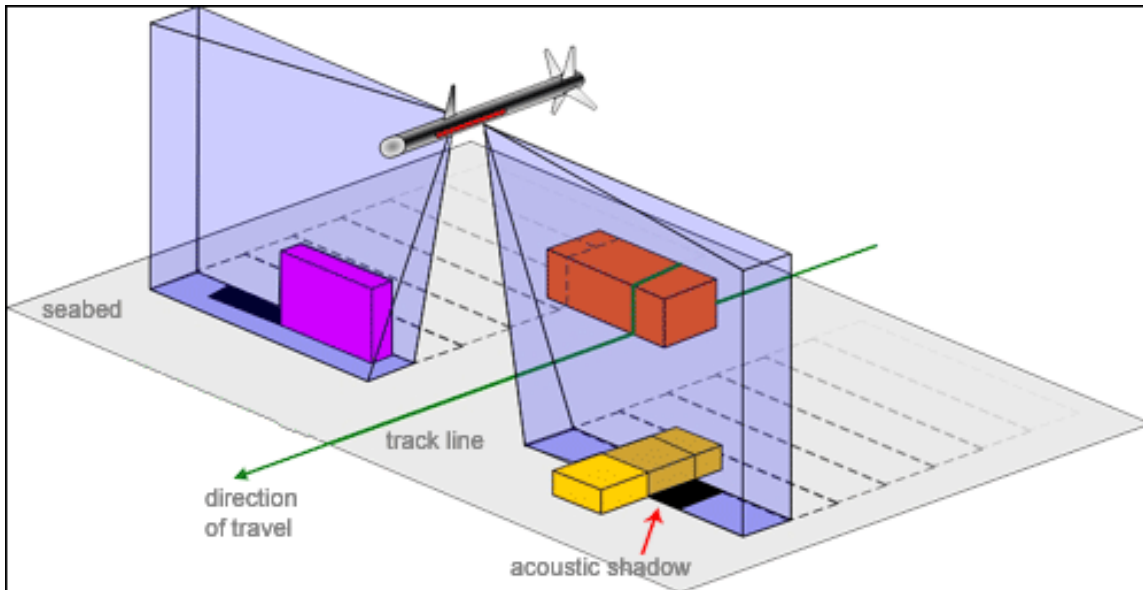


Figura 8. Esquema del funcionamiento del SSS donde se ilustra la zona ciega [18].

En la imagen anterior se observa que los 2 generadores de pulsos no alcanzan a cubrir la totalidad de la zona escaneada, generando un punto ciego en la zona de escaneo y una línea llamada nadir que corresponde con la trayectoria del sensor.

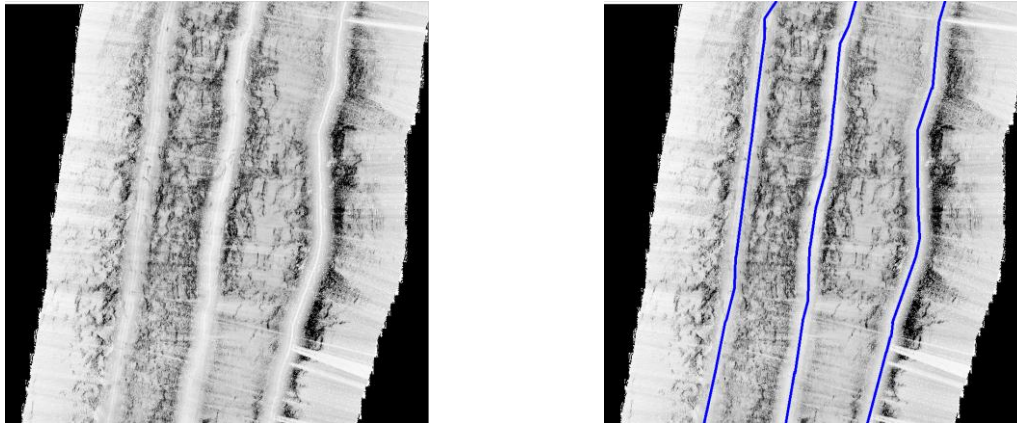


Figura 9. (izq.)Imagen acústica de un sustrato coralino, (der.) trayectoria de la embarcación (nadir) en color azul. imágenes suministradas por INVEMAR.

3.4. Características del SSS de INVEMAR.

En el 2012 INVEMAR adquirió un escáner de barrido lateral llamado SES 2000 – Compact, de la compañía Innomar, este perfilador de subsuelo marino es el más pequeño de los SSS que ofrece la empresa y está diseñado para aplicaciones de aguas poco profundas (<400m), se controla por medio de Ethernet y el software

de manejo es compatible con el sistema operativo windows [20], se ilustra una imagen del dispositivo a continuación y sus respectivas especificaciones técnicas en la tabla 2.



Figura 10. Fotografía del SES 2000 – Compact de Innomar.

Rango de profundidad	0-400 metros
Penetración de sedimentos	Hasta 40 metros
Resolución	Hasta 5 centímetros
Frecuencia	90- 115KHz
Adquisición de datos	Envolvente de 24 Bits digital en formato SLF o PHF
Entrada auxiliar	GPS
Fuente de alimentación	100-240 V AC o 11-30 V DC
Dimensiones/peso (transductor)	0.30m x 0.40m x 0.08m 22Kg
Dimensiones/peso (unidad de adquisición)	0.30m x 0.40m x 0.30m 19Kg

Tabla 2. Especificaciones técnicas SES 2000 – Compact de Innomar.

El software de manejo, adquisición de datos y post-procesamiento llamado SESWIN despliega en tiempo real la zona escaneada del fondo marino además se encarga de correlacionar los datos adquiridos con un GPS y genera imágenes acústicas en formato de archivo digital de imagen .TIFF [20].

4. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES ACUSTICAS

Para capturar una imagen acústica, el SSS escanea secuencialmente la superficie marina adquiriendo parte de la energía que resulta en la reflexión de los pulsos

acústicos, esta información es almacenada en diferentes pixeles, obteniendo una representación (imagen acústica) de los distintos sustratos marinos presentes en la zona de escaneo [15].

a continuación se ilustra una figura donde se aprecian las formaciones coralinas y arenosas en la zona de escaneo y una segmentación de la imagen de los sustratos anteriormente mencionados.

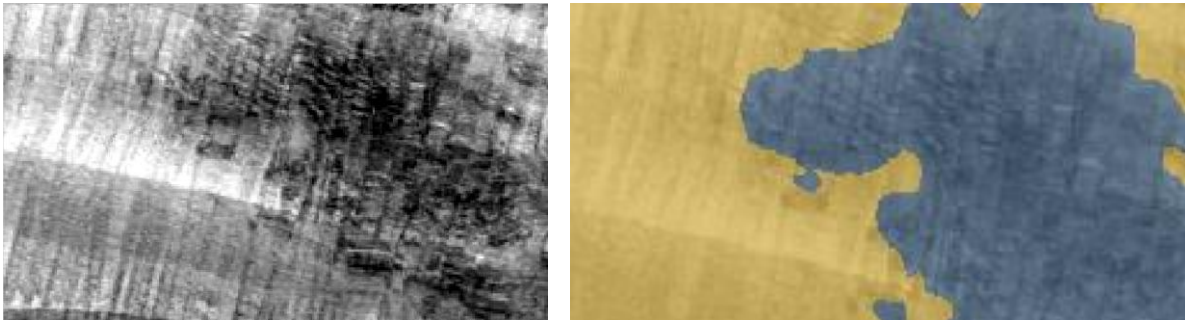


Figura 11. (Izquierda) imagen obtenida por el SSS, (derecha) imagen segmentada de los sustratos.

4.2. Adquisición y pre procesamiento de las imágenes.

Debido a la forma en la se obtiene las imágenes acústicas se presentan diversos tipos de errores, produciendo variaciones de posición, forma, tono y tamaño de los distintos sustratos marinos en las imágenes acústicas, las distorsiones más frecuentes son:

- Distorsiones debido al frecuente movimiento de la superficie del agua donde se desplaza el dispositivo.
- Cambios en la ganancia debido a fluctuaciones en la profundidad del fondo marino.
- Distorsiones provocadas por la columna de agua, distintos elementos presentes en esa zona cambian la velocidad de propagación del sonido.

Para obtener los mosaicos de imágenes acústicas el dispositivo SSS anclado a un barco realizo recorridos en zigzag ya que esta es una de las formas más eficientes en cuanto a energía consumida y tiempo al momento de escanear una zona.

A continuación se ilustra una imagen de las zonas escaneadas a partir de las trayectorias del dispositivo en las inmediaciones de las islas del Rosario.

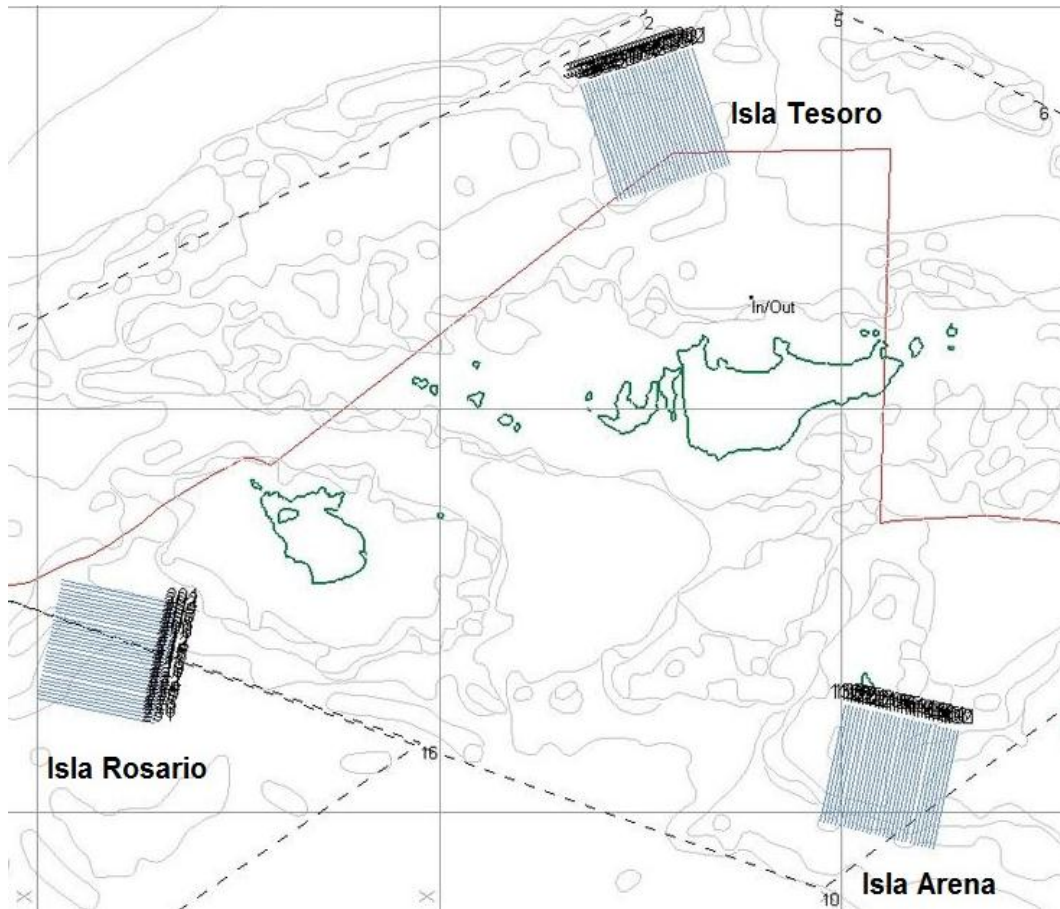


Figura 12. Trayectorias del SSS (Azul) sobre las zonas de estudio

El método presentado para adquirir imágenes acústicas exhibe un error geométrico debido a las distorsiones mencionadas anteriormente, este error hace referencia a cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles de una imagen, por ejemplo, mientras el SSS está escaneando una zona puede aparecer una onda sísmica que desplace la embarcación donde se encuentra el sensor, este desplazamiento puede ser perpendicular, paralelo o una combinación de ambos, produciendo en la imagen acústica resultante un error geométrico, que se puede modelar mediante una transformación numérica de la siguiente manera [21].

$$F(x, y) = G(f, g) \quad [f]$$

Donde (x,y) hace referencia a las coordenadas de la imagen corregida y (f,g) son las coordenadas de la imagen de entrada, las correcciones de este error se pueden hacer mediante el uso de acelerómetros que detecten los cambios bruscos en la embarcación además de un sistema de posicionamiento global, donde estos datos sirvan para minimizar el factor de error G.

Otro error que se presenta durante la adquisición de imágenes es causado por las variaciones en la velocidad del sonido de los pulsos generados por el SSS, debido a la presencia de diferentes componentes o propiedades en la columna de agua que alteran la geometría o la velocidad del frente de onda [13]., algunos ejemplos son:

- Gradientes de temperatura, desde la superficie del agua hasta el fondo marino.
- Bancos de peces y en general cualquier tipo de fauna marina.
- Corrientes de agua submarina.
- Variaciones en las diferentes propiedades químicas como la salinidad.

Estos fenómenos producen distorsiones que hacen que los valores codificados por el SSS no correspondan con los valores reales de reflectancia en la reconstrucción de imágenes acústicas.

4.3. Método de reconstrucción de nadir.

Este método consiste en la interpolación de imágenes con el fin de restaurar zonas incompletas o dañadas de las mismas, esta técnica fue introducida por Sapiro, Caselles en el año 2000 con la aplicación de nuevos sistemas de restauración de fotos, zoom, super-resolución, y la ocultación de errores en la transmisión inalámbrica de imágenes, entre otros [22].

Existen numerosos métodos para la reconstrucción de imágenes pero todos siguen la misma base metodológica descrita a continuación [23].

Primero: la sección perdida o dañada de la imagen se rellena utilizando información del resto de la imagen.

Segundo: las estructuras geométricas presentes alrededor de los píxeles dañados o perdidos, es prolongada hacia la región donde se aplica la reconstrucción.

Tercero: las diversas zonas que se generan con el paso anterior son rellenadas con el color que corresponda a la región de frontera.

Finalmente: se pintan las pequeñas discontinuidades generadas para mantener uniformidad.

A continuación se ilustra una imagen donde el objeto que aparece subrayado en rojo se elimina mediante el algoritmo de reconstrucción mencionado anteriormente.



Figura 13. (Izq.) imagen señalizada con rojo el área a suprimir, (der.) Imagen reconstruida.

4.4. Las texturas en las imágenes acústicas.

En el procesamiento digital de imágenes, una de las definiciones de textura es: un descriptor que da una medida de las propiedades como suavidad, heterogeneidad o regularidad en una imagen [24], también se define como la repetición ya sea periódica, quasi-periódica o aleatoria de un conjunto de píxeles [25].

Todos los sustratos marinos presentes en las imágenes acústicas se pueden analizar como un conjunto de texturas que representan el mosaico del fondo marino [13], por ejemplo los fondos arenosos son representados por texturas suaves y continuas, los fondos coralinos tienen una textura rugosa y discontinua debido a las múltiples sombras acústicas que se presentan en dicho relieve, y los fondos sedimentos gruesos se aprecian como una alteración a la continuidad textural presentada por un fondo arenoso, los sustratos más comunes encontrados en las zonas de estudio presentadas en este documento se muestran en la figura 14.

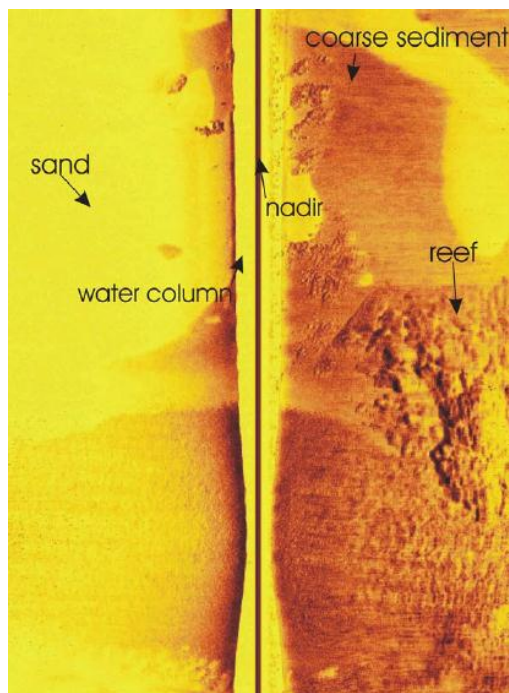


Figura 14. Características de las imágenes acústicas [26].

4.5. Filtro de Gabor.

El origen de las funciones de Gabor se remonta a 1946 cuando Dennis Gabor definió la función de la Short Time Fourier Transform (STFT), posteriormente JG Daugman en 1985 descubrió que estas funciones modelaban de manera lineal el comportamiento de células simples en la corteza visual de los cerebros de los mamíferos[27].

Gabor introdujo en la *STFT* una familia de *wavelets* no ortogonales con soporte infinito basadas en las traslaciones sobre una función *Gaussiana* [28]. La aplicación de las funciones de Gabor se puede realizar como filtros en el dominio de la frecuencia para extraer características de textura específicas de cada frecuencia y orientación, es decir, se puede aplicar la transformada de Gabor mediante bancos de filtros discretos. Un banco de filtros Gabor es un banco de filtros paso banda con forma *Gaussiana*, con doble cobertura del rango de frecuencias espaciales radiales y múltiples orientaciones, es decir, es un conjunto de filtros *Gaussianos* que cubren el dominio frecuencial con distintas frecuencias radiales y orientaciones [29].

En el dominio espacial, un filtro de Gabor consiste en una función *Gaussiana* modulada por una curva sinusoidal mostrada en la Figura

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_g^2} \exp\left[-\frac{(x^2+y^2)}{2\pi\sigma_g^2}\right] \exp(2\pi jF(x\cos\theta + y\sen\theta)) \quad [g]$$

Gráficamente se representan de la siguiente manera:

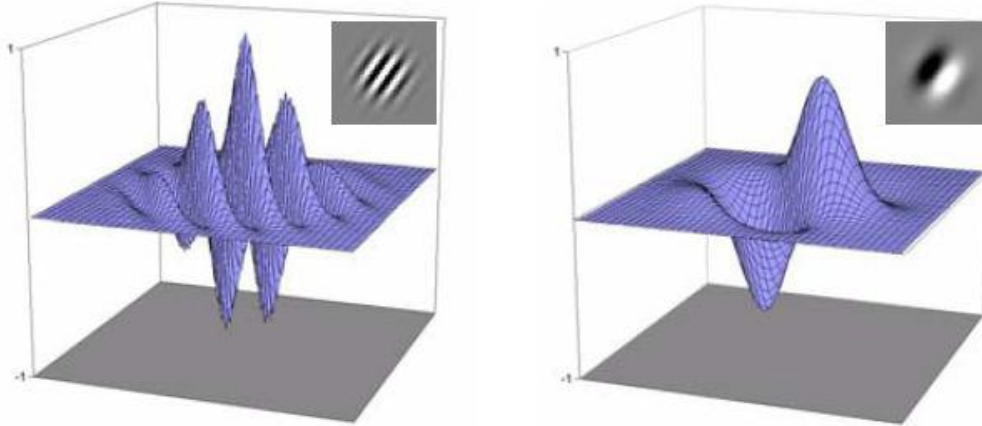


Figura 15. Parte real (izq) e imaginaria (der) de un filtro de Gabor

Donde σ_g determina la extensión espacial del filtro. En el dominio frecuencial, la función Gabor es una curva *Gaussiana*:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x'^2}{\sigma_x^2} + \frac{y'^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \exp(2\pi jf_c(x'\cos\beta + y'\sen\beta)) \quad [h]$$

Donde (x', y') son las coordenadas rotadas de (x, y) , es decir:

$$\begin{aligned} x' &= x\cos\theta + y\sen\theta \\ y' &= -x\sen\theta + y\cos\theta \end{aligned}$$

Los parámetros $\sigma_x\sigma_y$, controlan el ancho espacial y espectral de la función, los parámetros f_c y β controlan el desplazamiento en frecuencia en el dominio espectral y θ controla la rotación de las coordenadas.

La función de Gabor tiene la propiedad de tener un ancho efectivo finito tanto en el dominio espacial como en el espectral. Esto es importante en el análisis de texturas, especialmente en la segmentación, ya que diferentes texturas tienden a concentrar, en muchos casos, sus energías en rangos estrechos de frecuencias [29].

4.5.1. Segmentación con filtros de Gabor.

El algoritmo de segmentación de texturas con filtros de Gabor propuesto por Malik y Perona en 1989 e implementado por Naotoshi Seo en 2006 se compone de 3 pasos.

Primero se descompone la imagen en un banco de filtros de Gabor usando la ecuación [h] y definiendo un parámetro b dado por:

$$b = \log_2 \frac{\frac{\sigma}{\lambda} \pi + \sqrt{\frac{\ln 2}{2}}}{\frac{c}{\lambda} \pi - \sqrt{\frac{\ln 2}{2}}} \quad [i]$$

Dónde:

$$\frac{\sigma}{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\ln 2}{2} \frac{2^b + 1}{2^b - 1}} \quad [j]$$

Para ángulos comprendidos entre 0 y 90 grados se obtiene la parte real e imaginaria del filtro de Gabor respectivamente, donde solo es de interés la parte real en el análisis de texturas [30].

Como segundo paso, la extracción de características se utiliza una función sigmoide no lineal expresada como:

$$\tanh(\alpha t) = \frac{1 - e^{2\alpha t}}{1 + e^{2\alpha t}} \quad [k]$$

Esta función se usa para saturar la salida de los filtros; Otra característica es la desviación media absoluta para cada imagen filtrada, donde se utiliza la función de suavizado de gauss definida como:

$$g(x, y) = \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] \quad [11]$$

Donde σ es la desviación estándar, este parámetro se usa para determinar el tamaño de la ventana.

El tercer paso llamado en ingles *Clustering*, consiste en un agrupamiento de los pixeles en la imagen que representan las texturas mediante el siguiente algoritmo propuesto por Jain y Farrokhnia [31].

- a. Inicializar los centroides de K-means al azar
- b. Asignar a cada muestra el centroide mas cercano
- c. Calcular los centroides de K-means
- d. Si los centroides no se han modificado, descartar, de lo contrario repetir el paso b.

4.6. Clasificación digital de imágenes.

La clasificación digital es el proceso de agrupar los píxeles en un número finito de clases individuales o de categorías de datos con base en los niveles digitales de los datos [32]. Si un píxel satisface cierto criterio, entonces el píxel es asignado a la clase que corresponda a ese criterio.

Existen dos métodos de entrenamiento para acondicionar los clasificadores:

El método supervisado parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. En este método se identifican áreas suficientemente representativas (áreas de entrenamiento) de cada una de las categorías que componen la zona de trabajo. Finalizada la selección de las áreas de entrenamiento, es preciso calcular las características que permitan diferenciarlas, a partir de los niveles digitales incluidos en las áreas de entrenamiento asignadas a la clase, cuyo cálculo es aplicado a todas las bandas que intervienen en la clasificación [33].

El método no supervisado, se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. Lo cual no implica ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación que en la consecución de los resultados [28]. En esta estrategia, se asume que los niveles digitales de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados, más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivaldrían a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés [34].

Sin importar cuál de los dos métodos se utilice, siempre se debe contar con un sistema que se encargue de entender las diferentes opciones y de aprender cómo responder ante ciertas circunstancias, en este caso, ante cierta firma espectral. Los más conocidos y utilizados son: redes neuronales y sistemas expertos.

4.6.1. Redes Neuronales

Una red neuronal artificial (RNA por sus siglas en inglés), trata de simular el comportamiento del cerebro humano y más específicamente, el proceso de aprendizaje. Para esto se construyen de forma virtual, los mismos componentes: las neuronas, representadas por nodos, y la sinapsis por conexiones [35], el paralelo presente entre una RNA biológica y una artificial se muestra a continuación:

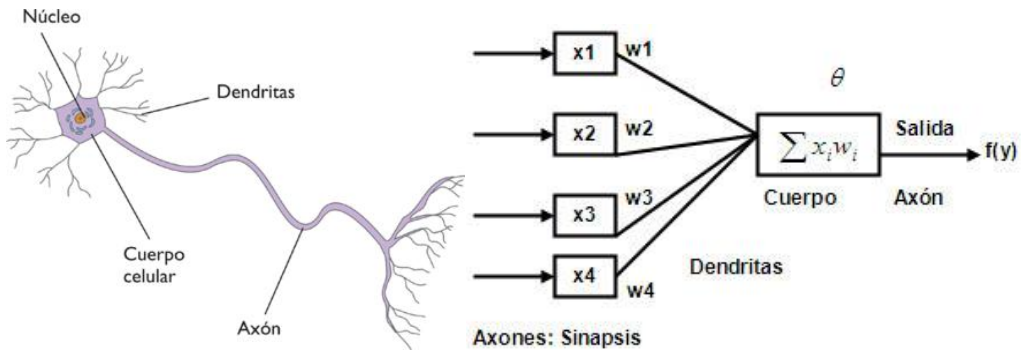


Figura 16. Paralelo de una neurona natural (izquierda) [36] y artificial (derecha) [35].

Las redes neuronales artificiales se inspiran en la estructura del cerebro y tratan de duplicar características tales como manejar información ambigua, múltiple e inconsistente, no necesitar programación y aprender con el tiempo, sin pretender lograr una reproducción exacta de tan complejo y eficaz sistema biológico [32].

Existe una configuración de las RNA llamada perceptrón multicapa también conocido como red de retro programación que está formada por múltiples capas de neuronas artificiales localmente conectadas, estas capas se dividen en 3 tipos:

- Capa de entrada: las neuronas ahí presentes introducen los patrones de entrada en la red, y no se produce procesamiento.
- Capas ocultas: compuesta por neuronas conectadas a la capa de entrada, está compuesta por una o múltiples capas dedicadas al procesamiento de la información.
- Capa de salida: las neuronas están encargadas de entregar la salida de toda la red.

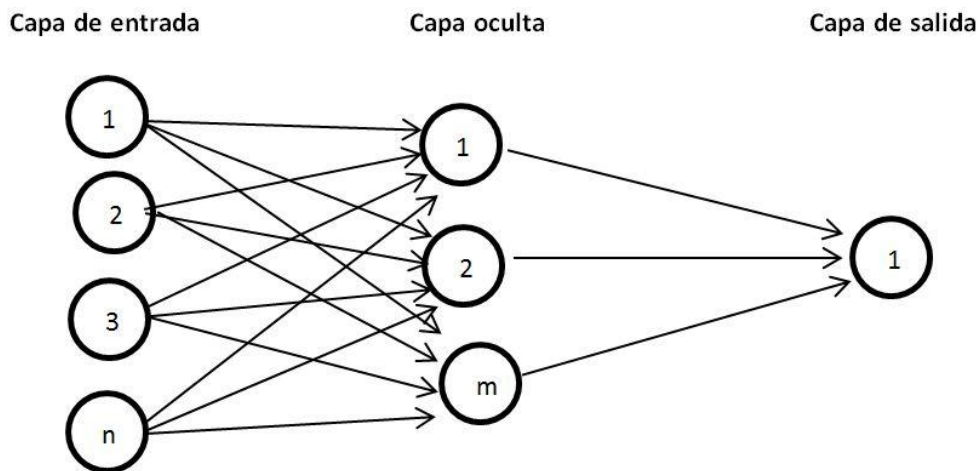


Figura 17. Diagrama de un perceptrón multicapa [33].

Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Esta salida viene dada por tres funciones:

- **Función de propagación:** Por lo general consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión.
- **Función de activación:** modifica a la anterior. Puede no existir, dando como salida la misma función de propagación.
- **Función de transferencia:** se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acortar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que se desea dar a dichas salidas. Algunas de las más utilizadas son la función sigmoidea y la tangente hiperbólica.

Para que la red pueda aprender cómo responder ante cierto estímulo, es necesario realizar un entrenamiento previo, en el cual se le pasan las características o parámetros de un conjunto de prueba y se le indica a que objeto o circunstancia corresponden [37]. Posterior a esto, el sistema es entrenado para asociar todas esas características a una respuesta deseada, y luego puesto en prueba con todos los datos del conjunto a analizar.

4.6.2. Sistema experto

Se define como un sistema informático que simula a los expertos humanos en un área de especialización dada, este sistema es capaz de procesar y almacenar información, aprender y razonar en situaciones deterministas e inciertas, algunas de las ventajas de los sistemas expertos son [39]:

- El conocimiento de varios expertos humanos puede combinarse, en un sistema experto artificial, haciéndolo más fiable.
- Debido a la capacidad de operar un número elevado de operaciones complejas, suministran respuestas rápidas y fiables.
- Pueden ser utilizados para realizar operaciones monótonas, aburridas o incómodas para los humanos.

- Los sistemas expertos pueden clasificarse en dos tipos principales según la naturaleza del problema para los que están diseñados: deterministas y estocásticos [14].

Las componentes principales del sistema experto son:

- la base de conocimiento con reglas estructuradas y ordenadas además de un conjunto de relaciones bien definidas.
- el motor de inferencia encargado de sacar conclusiones aplicando el conocimiento de los datos.
- el sistema de aprendizaje con la habilidad de obtener experiencia a partir de los datos disponibles.

5. RESULTADOS

A partir de la información adquirida con perfiles de subsuelo, en el marco del proyecto de Caracterización geológica y oceanográfica realizado por Idarraga *et al.* (2012), se seleccionaron tres áreas de interés para la adquisición de información con sonar de barrido lateral (figura 18), Estas áreas se escogieron teniendo en cuenta la profundidad y la variedad de rasgos que podrían identificarse en cada una, representando posiblemente la clasificación de fondos que se encuentran en toda la extensión de las islas del Rosario, a continuación se ilustran las zonas de muestreo como mapas de profundidad.

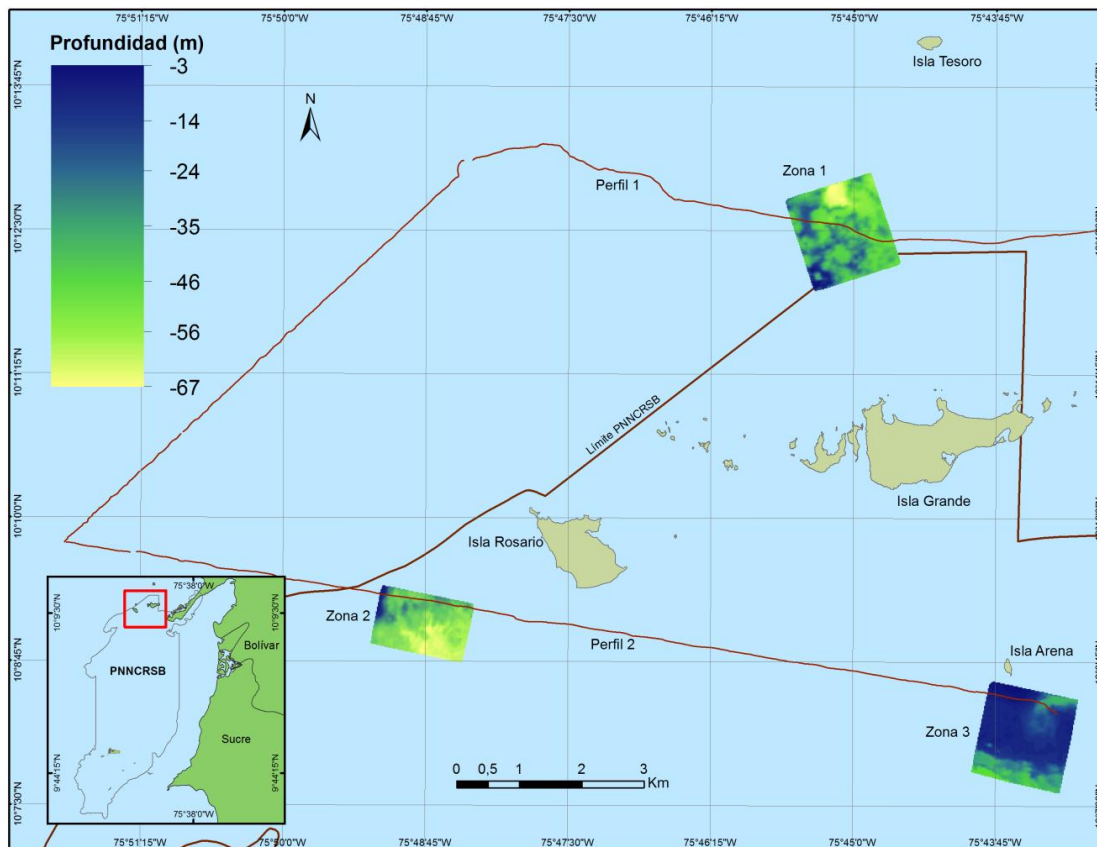


Figura 18. Localización de las zonas adquiridas con el sonar de barrido lateral dentro del área de estudio, suministrado por INVEMAR.

Entre el 17 y 19 de octubre de 2012 se registraron con sonar de barrido lateral tres zonas en inmediaciones de las islas del Rosario Tabla 3. Se utilizó un sistema de adquisición acústico marca SES2000 compact (INNOMAR), con frecuencia de 100 kHz, y un sistema de posicionamiento satelital TOPCON GMS2.

Zona	Área (ha)
Zona 1: entre Isla Grande e Isla Tesoro	240.6
Zona 2: Suroccidente de Isla Rosario	161.5
Zona 3: Sur de Isla Arena	630.8

Tabla 3. Área correspondiente a las zonas escaneadas con el SSS.

5.1 Imágenes acústicas marinas obtenidas con el SSS.

La primera parte del pre procesamiento consistió en el acondicionamiento de las imágenes obtenidas por el SSS (figura 19.1) debido al funcionamiento del dispositivo las imágenes presentan una discontinuidad correspondiente al tiempo entre pulso y pulso generado por el escáner, para corregir este problema se procedió con la interpolación de las zonas donde no había información (figura 18.2) y posteriormente un ajuste de contraste con el fin de resaltar los diferentes tipos de texturas presentes (figura 19.3).

A continuación se ilustraran una zona de las imágenes obtenidas por el SSS que fueron procesadas por el software Simple Side Scan Processor V1.2 (Innomar, 2007).

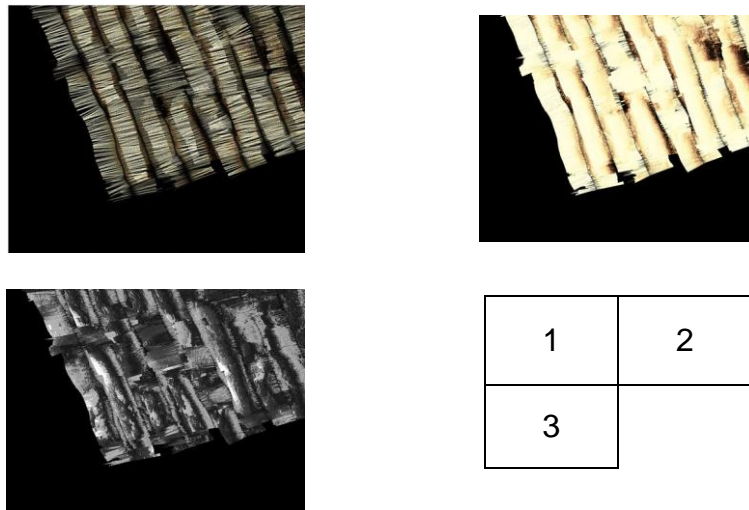


Figura 19. 1. imágenes obtenidas por el SSS, 2. Imagen interpolada, 3. Imagen con ajuste de contraste.

Debido al tamaño de los mosaicos obtenidos con el SSS, dichas imágenes y las matrices procesadas posteriormente se encuentran en el anexo 1.

5.2. Características de los sustratos presentes en las imágenes acústicas.

A partir de la interpretación de los mosaicos de sonar de barrido lateral se identificaron las distribuciones de dos tipos principales de fondos marinos correspondientes a fondos arenosos y fondos coralinos, ambos de origen biogénicos. Estos fondos se subdividieron según la respuesta acústica o las distribuciones espaciales, resultando en la clasificación en cinco clases:

Fondos arenosos: Zonas de alta reflectividad asociadas a lugares de bajo relieve, áreas de depósitos arenosos en cuencas, cañones y depresiones, formas que son características de los relieves kársticos.

Fondos arenosos poblados por fanerógamas: Sustrato con alta reflectividad en los mosaicos parcialmente cubiertos con zonas de baja reflectividad debido a la presencia de praderas de pastos marinos. Se ubican en áreas de baja pendiente y rugosidad, pueden incluir parches de arena descubiertos o bloques calcáreos aislados.

Formaciones coralinas: (Sustrato de arrecifes coralinos) Correspondientes a áreas con cobertura de corales, formados sobre plataformas arrecifales antiguas, terrazas, laderas o domos diapíricos que alcanzan profundidades hasta 50 m. Se identifican en el mosaico de barrido lateral por una alta reflectividad y textura con rugosidad notable. Las comunidades coralinas presentes pueden variar de un área a otra según el predominio de las especies asociadas, entre ellos *Agaricia* spp. y *Millepora* spp.

Formaciones coralinas dispersas: (Sustrato de bloques coralinos) Hace referencia a las áreas donde se encuentran bloques de composición calcárea y formación de corales sobre ellos, yaciendo sobre el plano sedimentario de composición arenosa a gravas finas. La proporción de bloques con respecto a los planos descubiertos es variable hasta semejar una formación coralina, de la cual se diferencia por presentar una menor rugosidad. En las comunidades coralinas presentes se destacan *Montastrea* spp., *Millepora* spp. y gorgonáceos.

Formaciones coralinas y derrubios: Fondos con presencia de corales y bloques al borde inferior de las laderas en zonas de corales, en los mosaicos presentan baja reflectividad relativa con respecto a la de las formaciones coralinas y mayor rugosidad que los fondos arenosos.

Al realizar un análisis de los histogramas, se observa una distribución gaussiana sobre todo el rango dinámico en los niveles de gris (figura 23), se puede decir que la media de estas distribuciones indica el sustrato dominante en las imágenes, por ejemplo en el caso del histograma mostrado para el mosaico Isla arena la campana de gauss tiene su cresta en el nivel de gris 225, lo que indica una alta reflectividad esto se debe a la presencia de formaciones arenosas y/o coralinas.

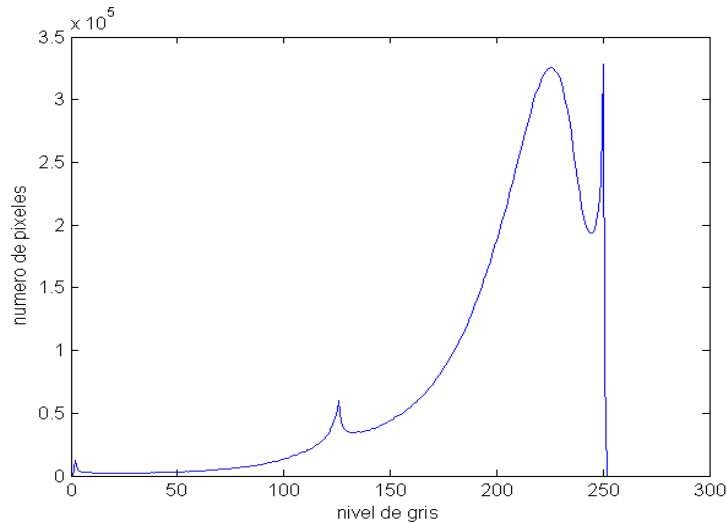


Figura 20. Histograma correspondiente a la imagen Isla Arena.

Por el contrario los histogramas correspondientes a Isla Tesoro y rosario, presentan una distribución más dispersa sobre el rango dinámico y centrada en los valores de nivel de gris, lo que indica que en estas imágenes contienen una mayor cantidad de formaciones mixtas.

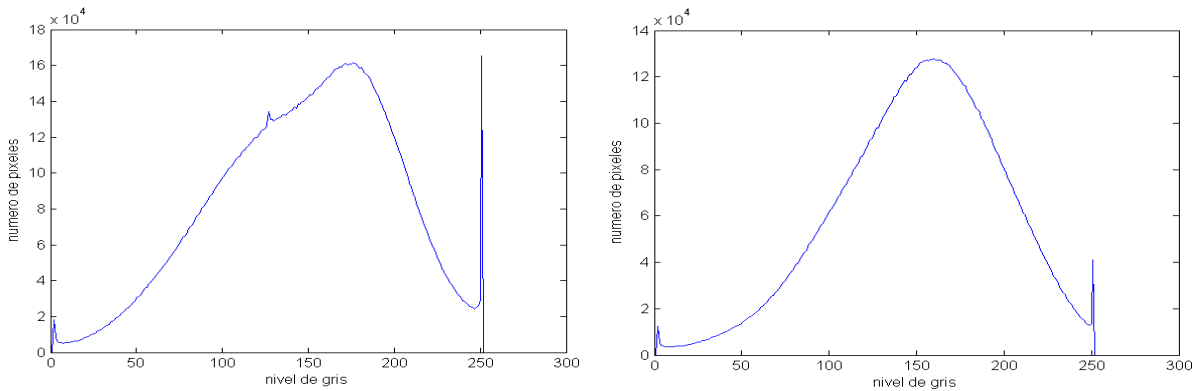


Figura 21. Histograma correspondiente a la imagen Isla Tesoro (Izq.) e isla del Rosario (der.)

Debido a que las regiones de interés como las formaciones coralinas son una combinación de píxeles de diferentes valores de gris, su diferenciación no puede basarse en métodos segmentación como la umbralización.

5.3. Supresión del nadir

Como se mencionó en la sección 3.3., las imágenes obtenidas por el SSS tienen una zona ciega, que se traduce en pérdida de cierta cantidad de información, esta característica de las imágenes acústicas debe ser removida con el fin de garantizar una continuidad textural en los fondos marinos representados por estas imágenes, esto se hace con el fin de adecuar las matrices para las etapas posteriores de segmentación textural.

Para realizar la corrección de estas imágenes se debe contar con dos imágenes de la misma zona, una que es la imagen acústica y la otra que es una imagen donde se indique la trayectoria de la embarcación que contiene el SSS llamada máscara, esta última imagen se obtuvo mediante la segmentación por umbralización ya que el nadir o ausencia de información corresponde con las zonas de saturación o zonas de color negro en las imágenes acústicas respectivamente.

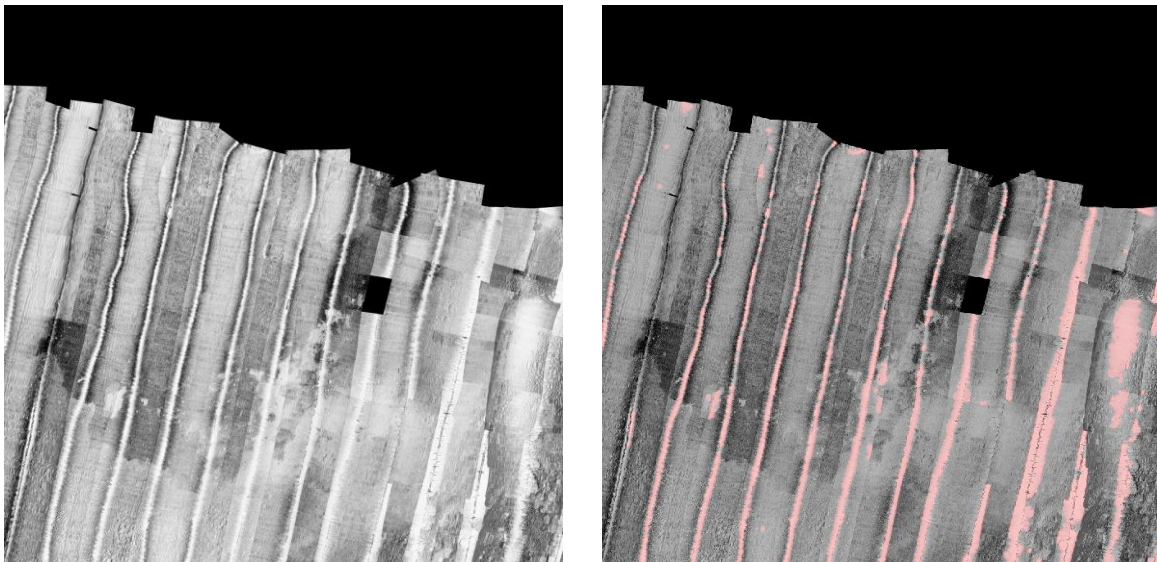


Figura 22. (Izq.) Segmento de imagen Isla de Arena, (der.) Máscara de trayectorias e imagen.

Una vez obtenida la máscara se aplicó un algoritmo de reconstrucción que reemplazó los píxeles de la máscara por píxeles vecinos a la región del nadir con el fin de mantener continuidad en la textura de las imágenes acústicas.

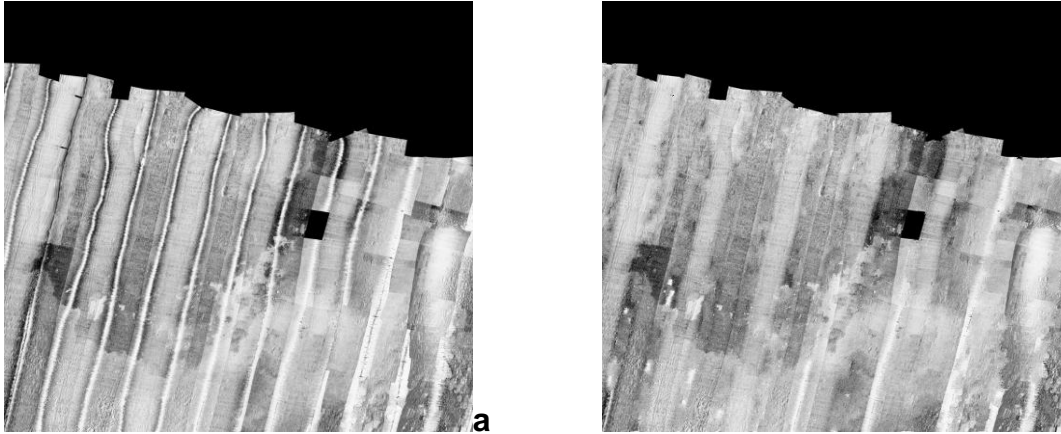


Figura 23. (a)Segmento de imagen Isla Arena, (b) reconstrucción en la región a,

5.4. Segmentación de texturas con filtros de Gabor

Para la segmentación textural de las imágenes acústicas se aplicó el algoritmo mostrado en la sección 4.3. Donde variando la frecuencia espacial media b de la ecuación [i], se obtiene las imágenes segmentadas de la figura 24.

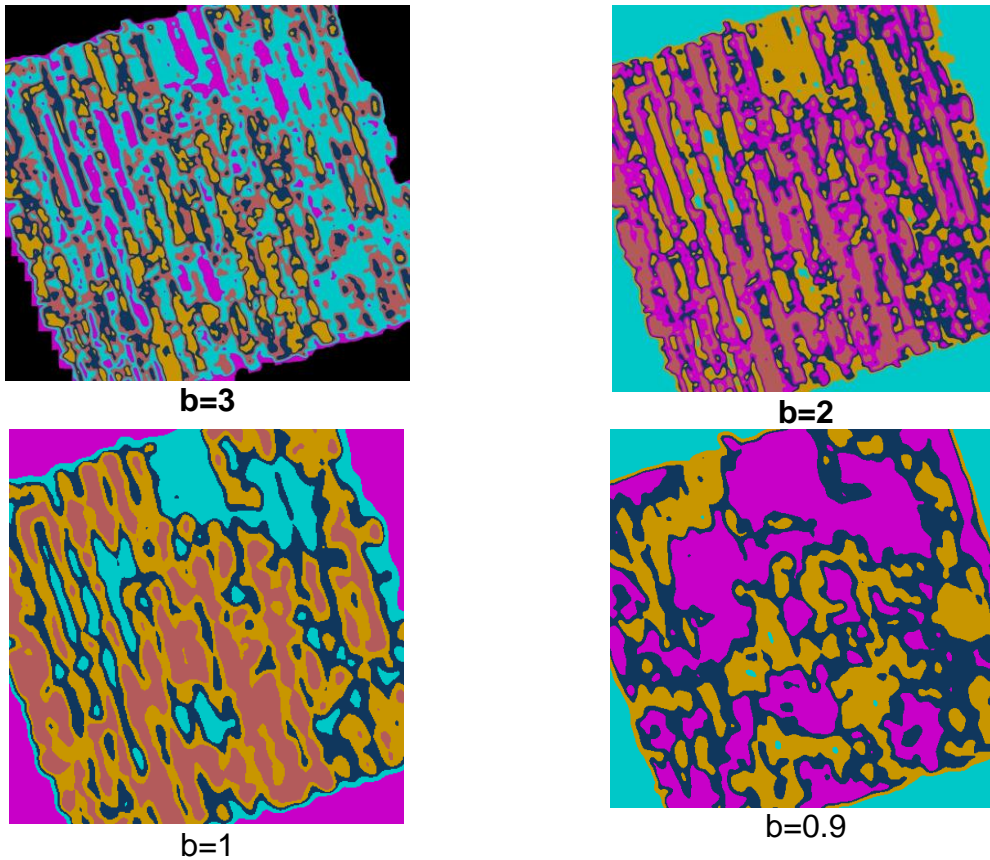


Figura 24. Segmentación de Isla Tesoro para diferentes parámetros b .

Para las imágenes presentadas en la figura 28 se superpuso la imagen obtenida mediante la segmentación de las imágenes previamente procesadas con el método de supresión de nadir sobre la imagen original. En este método de mapeo se aplicó una transparencia al 50% de la imagen segmentada con el fin de corroborar las texturas presentes en los sustratos marinos correspondieran con los segmentos obtenidos por el algoritmo mostrado en la sección 4.3.2. y así definir el mejor parámetro b dependiendo de cada mosaico.

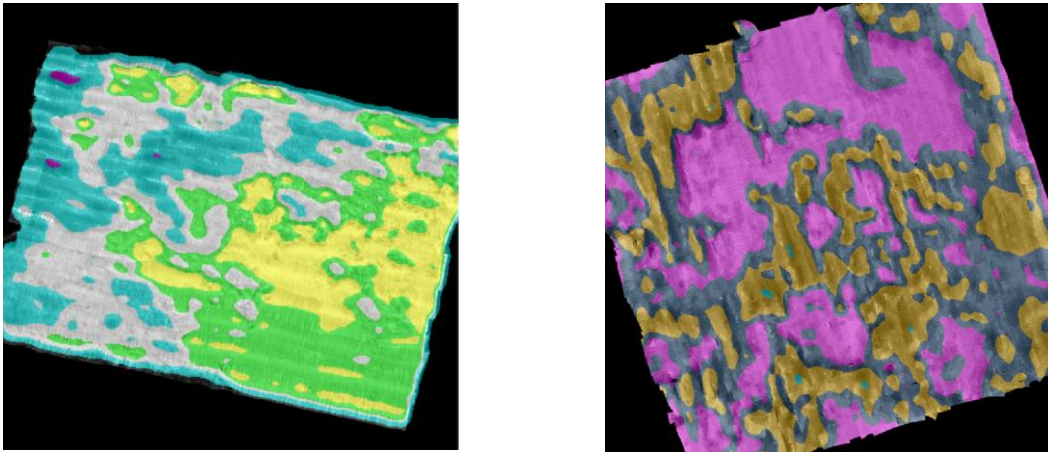


Figura 25. Segmentación de texturas en Isla Rosario (Izq.) segmentación de texturas en Isla Tesoro (der.)

Uno de los problemas de la segmentación con el filtro de Gabor es la incapacidad de reconocer la misma textura cuando se presentan diferentes cambios de ganancia en la imagen acústica figura 26, esta distorsión en las imágenes acústicas mencionado en la sección 2.4, se produce, ya que el manejo de la potencia de los pulsos se realiza de manera manual en la zona de muestreo de acuerdo a la profundidad escaneada.

Este problema se aprecia claramente en Isla Arena, los círculos rojos en la figura 29.(izq), donde una gran parte de la imagen correspondiente a formaciones coralinas, tiene un cambio en la ganancia que el algoritmo lo detecta como un cambio de textura, este problema en la adquisición de las imágenes se produjo ya que la zona de escaneo tenía una pendiente que hacía que los pulsos se dispersaran a mayor profundidad y tenían que ser compensados manualmente, para poder adquirir información de esa zona.

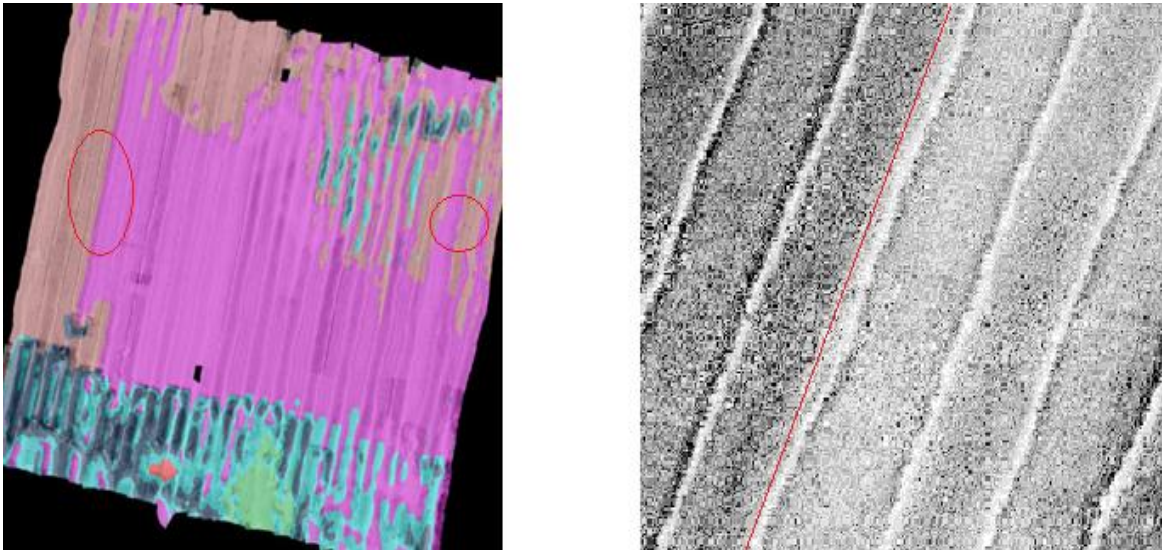


Figura 26. (Izq.) segmentación de texturas en Isla Arena, (der.) formaciones coralinas dispersas con cambio en la ganancia.

Para solucionar este problema de segmentación se procede con el análisis individual de cada uno de los segmentos texturales (figura 30) mediante la extracción de características de los sustratos más representativos en las 3 imágenes acústicas, estos valores obtenidos se usarán en un clasificador como se muestra en la sección 5.5.

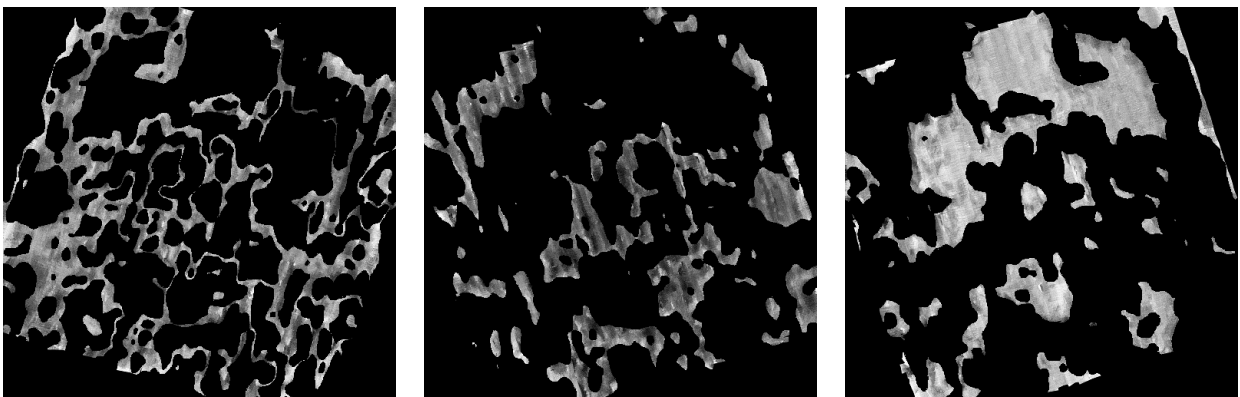
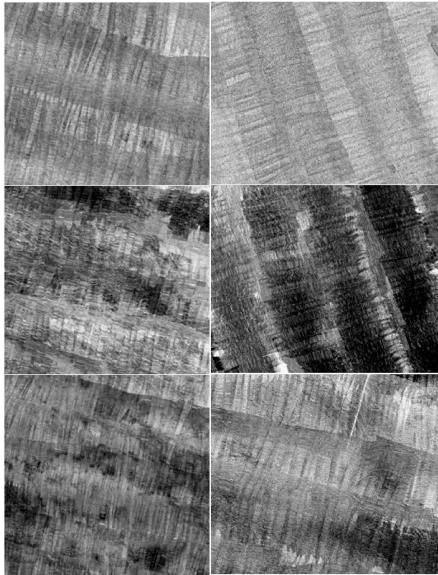


Figura 27. Segmentos texturales de Isla Tesoro.

5.5. CLASIFICACIÓN DE SUSTRATOS MARINOS.

Para la clasificación de sustratos marinos se creó una base de datos con ayuda de un experto mediante inspección visual, esta base de datos contiene imágenes de todos los distintos sustratos marinos presentes en las zonas de investigación (figura 31).



1	2
3	4
5	6

Figura 28. Sustratos presentes en las imágenes acústicas: (1) fondo arenoso, (2) fondos arenosos con fanerógamas (3) fondos coralinos 1, (4) fondos coralinos 2, (5) fondos coralinos medianamente dispersos (6) fondos coralinos muy dispersos.

Un parámetro adicional para el desarrollo del clasificador de los sustratos marinos fue el uso de los mapas de profundidad de las zonas escaneadas por el SSS (figura 29), estas imágenes se usaron con el fin de discriminar las variaciones en el nivel de gris en las imágenes acústicas debido a los cambios de ganancia del dispositivo o los cambios drásticos de profundidad en el fondo marino.

Los mapas de profundidad se obtuvieron mediante un dispositivo batimétrico que censaba las profundidades, simultáneamente con el escáner de barrido lateral, los datos de reflectividad textura y profundidad se correlacionaron mediante la Georeferenciación, de las coordenadas obtenidas por un sistema de posicionamiento, junto con la distancia calculada según el desplazamiento por la columna de agua del SSS.

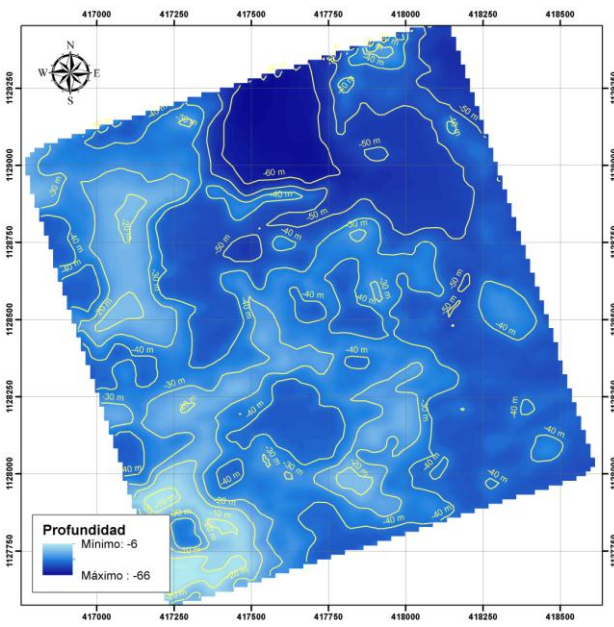
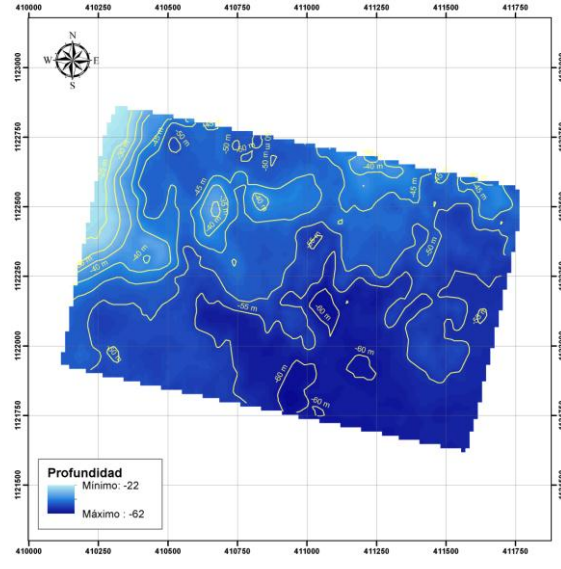
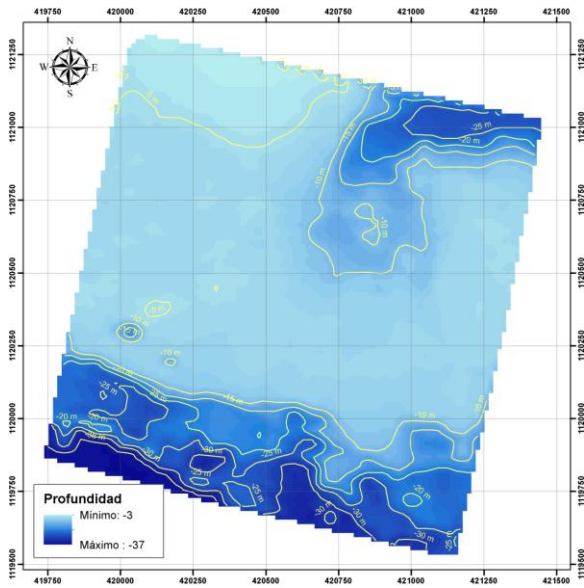


Figura 29. Mapas de profundidad en: 1. islas de arena, 2. islas del rosario, 3. Isla del Tesoro.

5.5.1. Extracción de características.

A partir de la segmentación de las regiones de análisis mostradas en la figura 28 y 30, se procede con una extracción de características para cada uno de los segmentos obtenidos.

- Entropía (E).
- Desviación estándar (S).
- Nivel de gris (L).
- Profundidad (P)

A continuación se representa dos espacios tridimensionales de características obtenidas de la base de datos donde se encuentran los sustratos marinos más representativos para la clasificación de las imágenes acústicas.

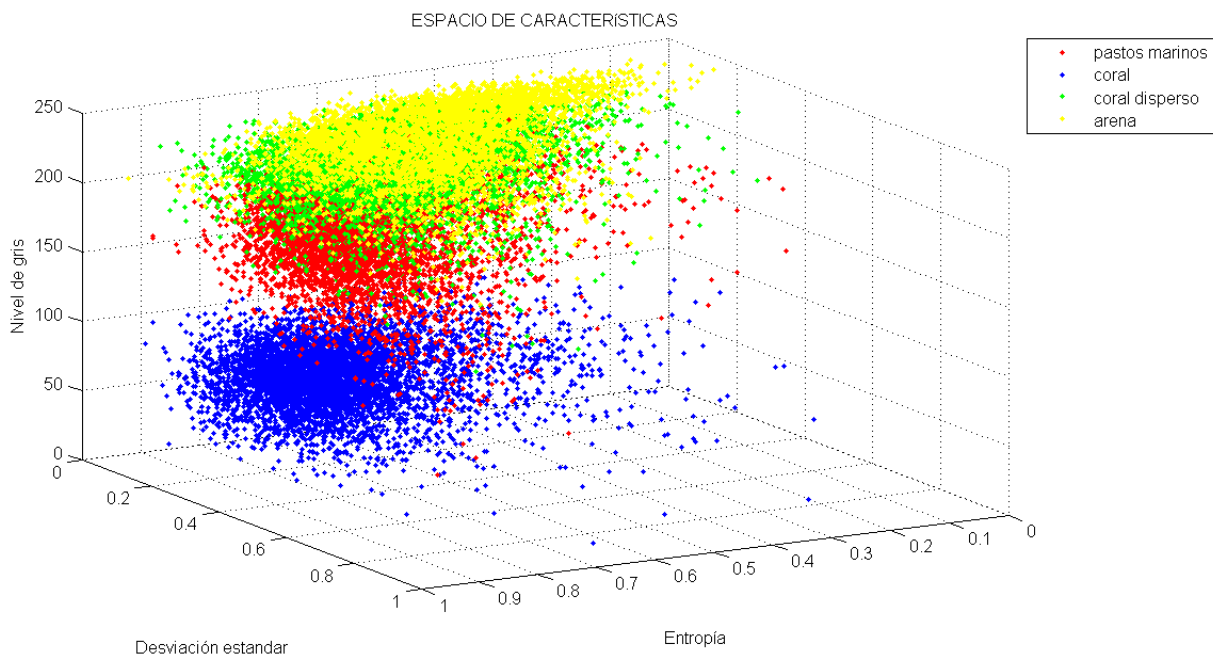


Figura 30. Espacio de características S-E-L de los sustratos marinos más representativos en las imágenes acústicas.

Se puede observar en la anterior figura que la nube de puntos asociado a la arena y el coral disperso se interceptan en el eje correspondiente al nivel de gris, esto se debe a que el comportamiento de la onda depende del tiempo de propagación y diversos factores nombrados en la sección 4.1, es por eso que se considera la inclusión de una cuarta característica (profundidad), con el fin de detectar las variaciones de ganancia debido a cambios bruscos de profundidad y discernir mejor los sustratos, mostrado en la figura 34.

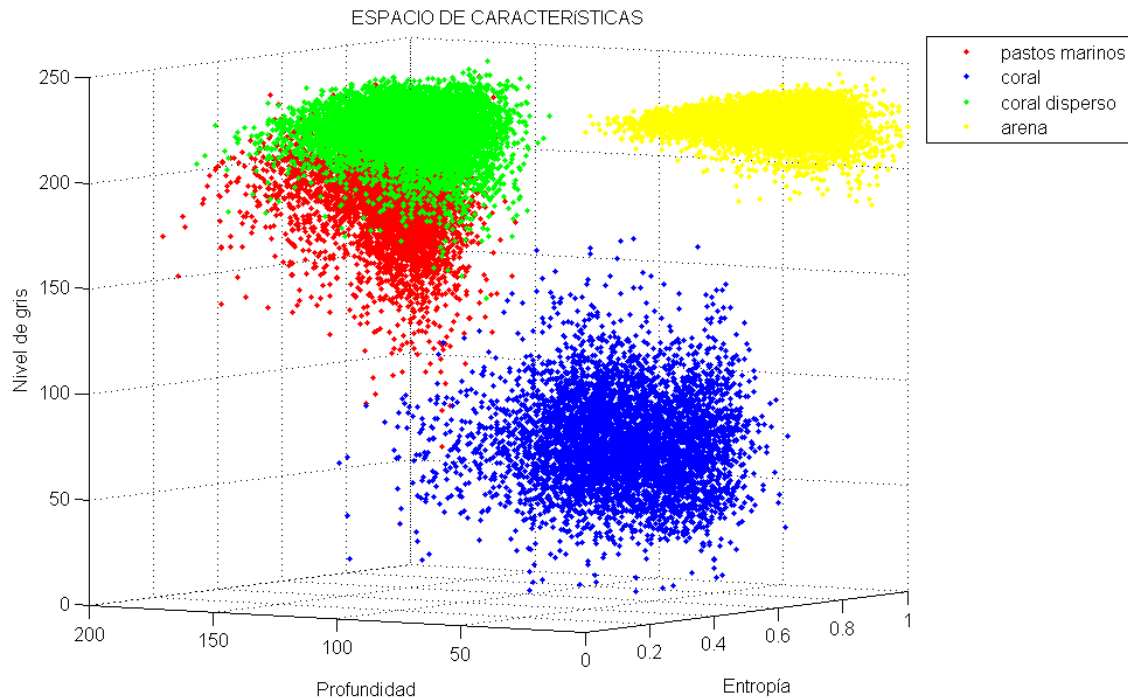


Figura 31. Espacio de características P-E-L de los sustratos marinos más representativos en las imágenes acústicas.

Debido a que se cuenta con 4 características asociadas a un espacio tetradimensional, en la figura 33 y 34 se consideran solo 3 de estas con el fin de poderlas graficar en un espacio tridimensional.

En la extracción de las características se considera la entropía como representativo de las características de energía y homogeneidad, esto se debe a que presenta una alta correlación entre estas variables [42], y fue demostrado en selección de descriptores mediante el análisis de componentes principales para la clasificación textural de imágenes satelitales.

También se consideró la desviación estándar y el nivel de gris, por las descripciones nombradas en la sección 5.2, por ejemplo la naturaleza uniforme de la arena, implica unos valores de niveles de gris aproximadamente constantes en cada uno de los píxeles que lo compone y una desviación estándar alta debido los patrones similares al ruido de sal y pimienta como se observa en el espacio de características de la figura 30, un caso contrario y opuesto es el coral, debido que presenta una mayor variabilidad textural observada en las imágenes acústicas, además posee una gran cantidad de píxeles con valores de gris bajos, esto se debe a la absorción de las ondas acústicas por las superficies orgánicas, generando una característica de nivel de gris mayormente baja.

5.5.2 Sistema de clasificación a partir de la red neuronal.

Para el entrenamiento de la red neuronal, se toma un conjunto de 5 muestras por cada tipo de sustrato presentes en Isla de Arena y Tesoro, de estas muestras se extrajo las 3 características mencionadas en la sección 5.5.1 junto con el nivel de gris correspondiente a la imagen de los mapas de profundidad (figura 29), creando una matriz de características M_c de la siguiente forma:

$$M_{c_{n \times m}} \begin{cases} n = 5, \text{ características } (E, S, L, P) \\ m = 25, \quad 4 \text{ sustratos y un fondo} \end{cases}$$

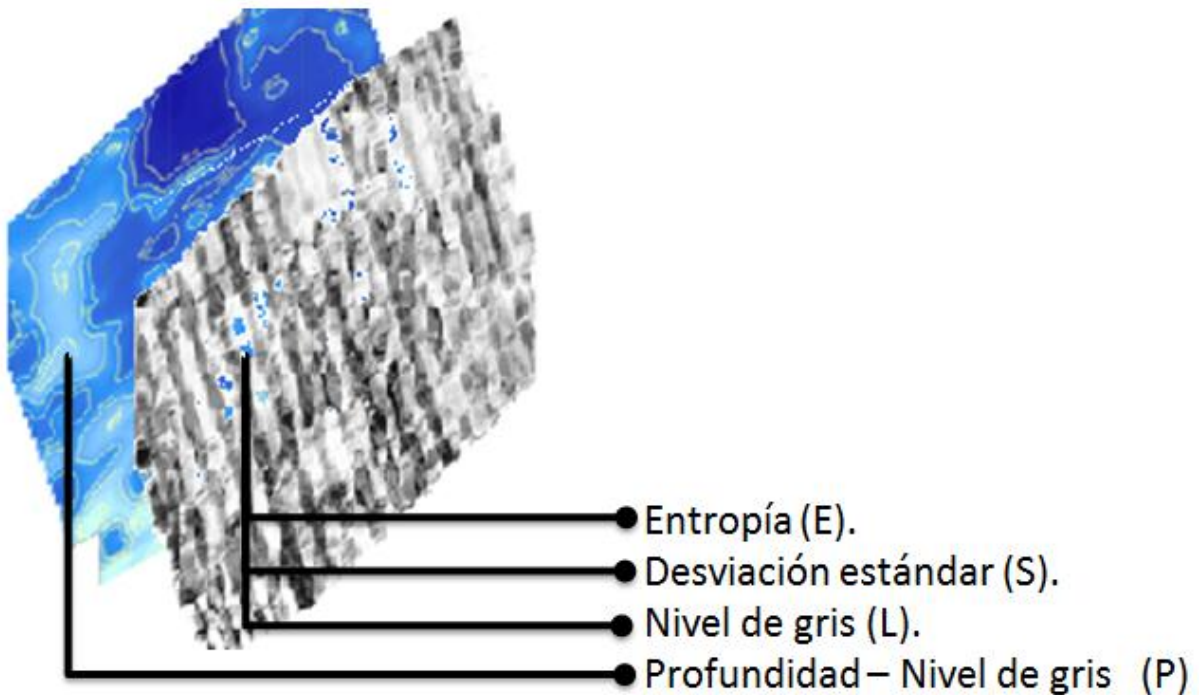


Figura 32. Matriz de extracción.

Posteriormente entrenó una red en configuración perceptrón multicapa con la siguiente configuración: 4 neuronas correspondientes a la capa de entrada, 24 neuronas ocultas dedicadas al procesamiento de la información y una neurona en la capa de salida como se observa en la figura 33.

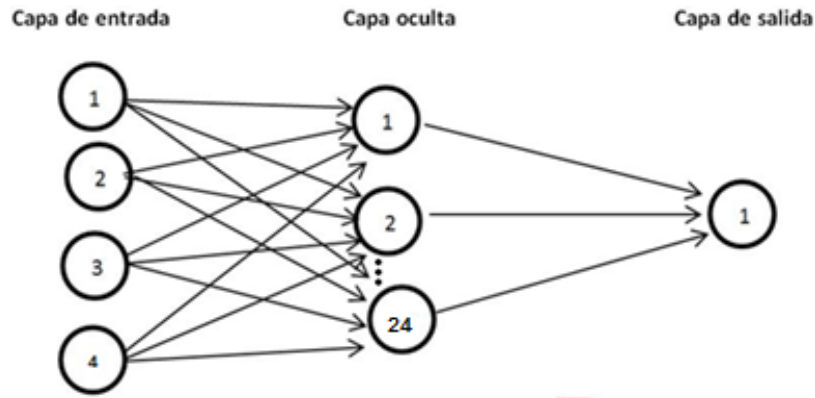


Figura 33. Configuración de la RNA.

El entrenamiento de la red se realizó de manera supervisada debido a que las muestras de entrenamiento seleccionadas eran plenamente identificables por un experto humano, ya que dichas muestras cumplían con las características de los sustratos mencionados en la sección 5.2, la red fue configurada con los pesos w_n de manera automática por el software de desarrollo, también se configuró el entrenamiento para 500 iteraciones con un error máximo del 0.1%, en la figura 34. Se observa la curva de rendimiento obtenida durante el entrenamiento de la RNA.

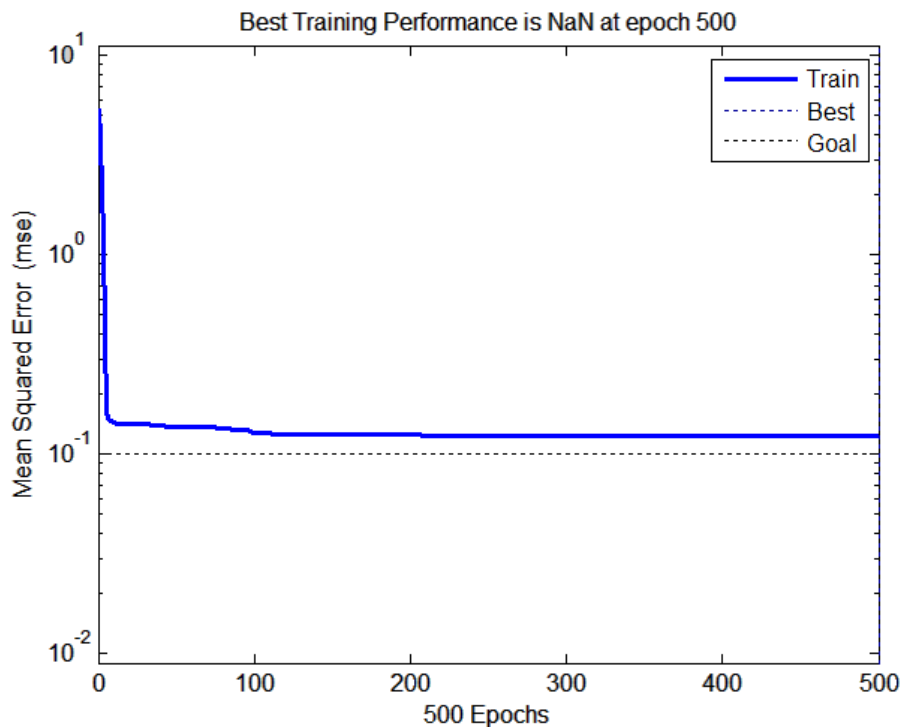


Figura 34. Curva de rendimiento en la RNA

En la figura 34 se observa un decremento del 90% en el error cuadrático medio para las primeras 200 iteraciones, esto se debe a que el número de muestras tomadas por cada tipo de sustrato es reducido con el fin de evitar un sobre muestreo de la base de datos y así reducir el número de falsos positivos debido a segmentos con características similares que representen sustratos distintos en las imágenes de prueba.

Debido a que ninguno de los 3 mosaicos de estudio tiene los 6 sustratos distintos para realizar la prueba de la RNA después de su entrenamiento, la prueba se realiza con los segmentos texturales obtenidos por el filtro de Gabor, con el fin de determinar la efectividad del sistema de clasificación, para ello se realizó un procesamiento de punto donde una máscara de 5x5 píxeles recorría la imagen y era clasificada por la RNA, entregando un valor de gris para cada sustrato identificado.

La imagen acústica que se clasificó corresponde a Isla Rosario se muestra en la figura 34, posteriormente en el anexo 1 se encuentran las 2 zonas restantes de estudio.

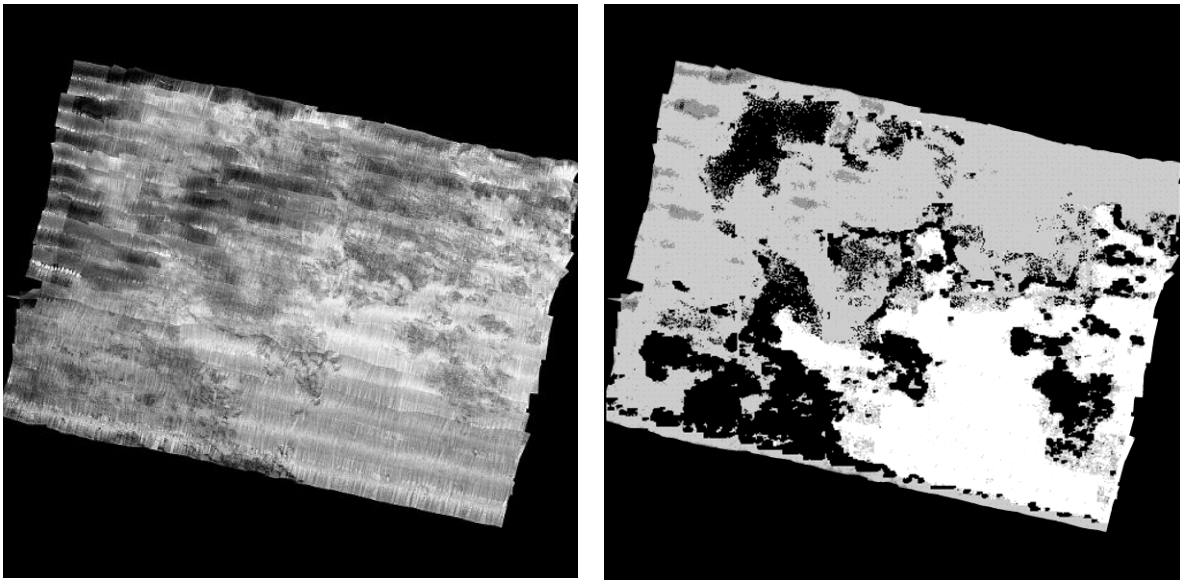
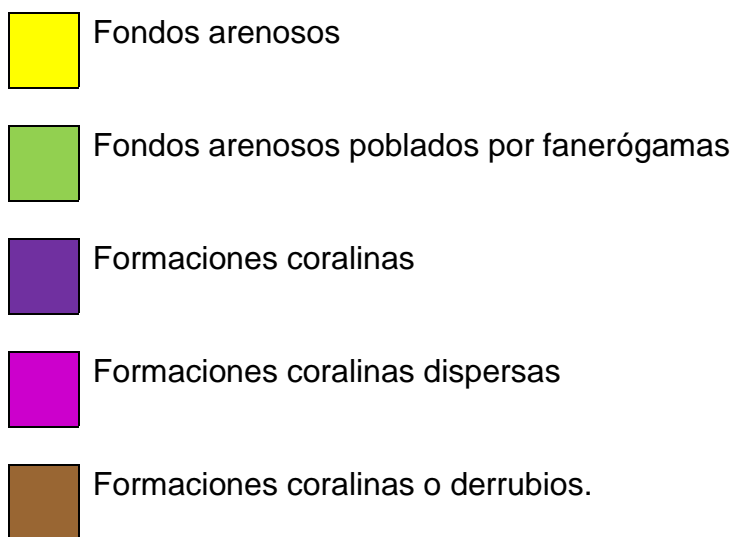


Figura 35. Resultado de la clasificación en Isla Rosario.

6. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

Los datos con los que se evaluó la efectividad del sistema, fueron obtenidos en zonas donde fue posible hacer buceos someros marcados en las figuras 36 y 42, a continuación se describe el relieve y la composición geológica y paisajística encontrada en las áreas de estudio realizada por un experto.

Con el fin de facilitar la visualización de la identificación de los distintos sustratos marinos realizados con la RNA se asigna un código de colores para cada tipo de fondo mostrados en las figuras 36,41,42.



6.1. Zona 1: Entre Isla Grande e Isla Tesoro

Esta área se encuentra 2 km al norte de Isla Grande. El mosaico adquirido representa 240 ha del área de estudio, se destaca por ser un área con irregularidades en el relieve, presentándose geo formas como domos probablemente asociados a diapiros de lodo, terrazas con profundidades entre 5 y 20 m, laderas con pendientes hasta 20°, depresiones, canales y planicies.

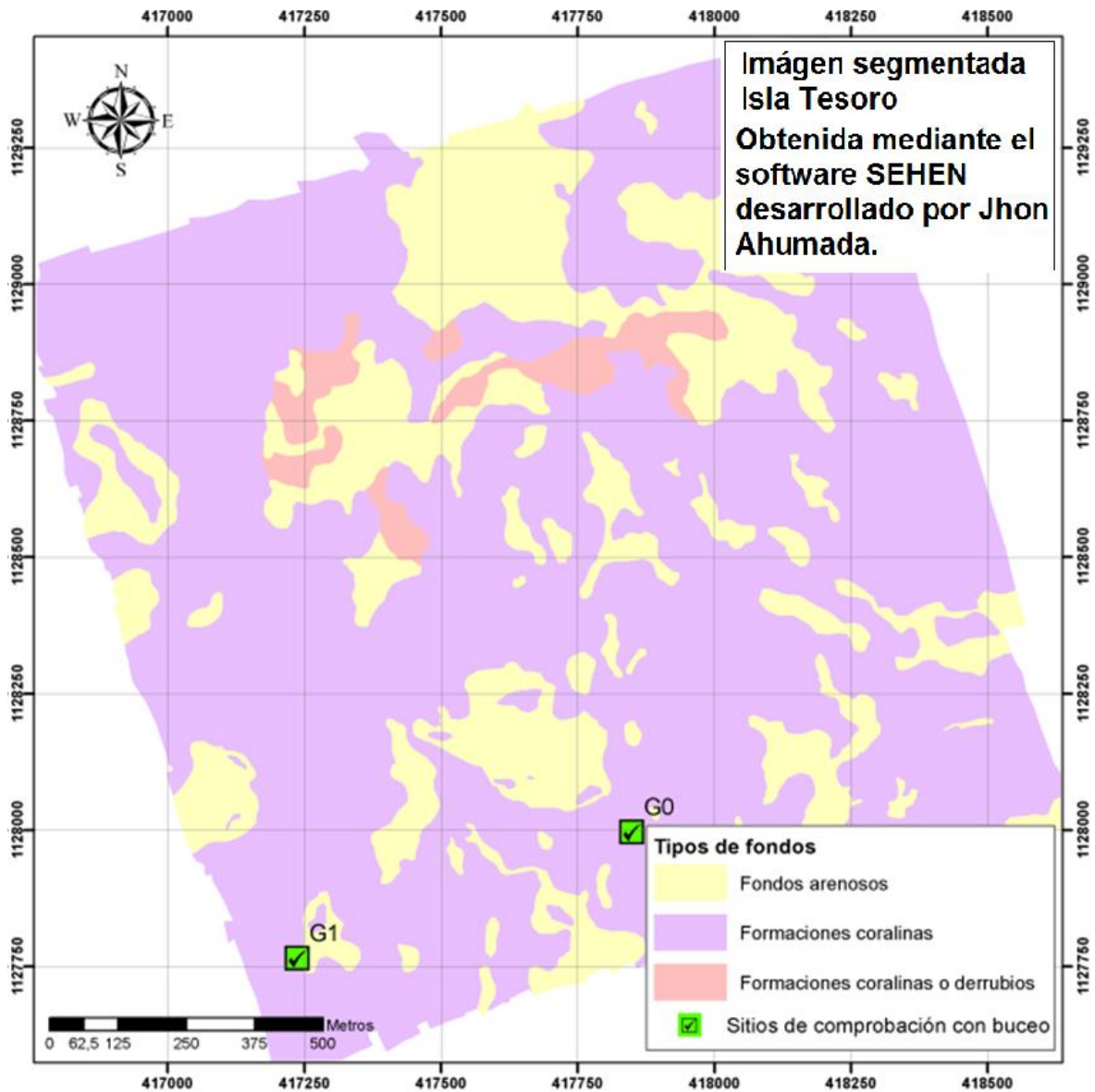


Figura 36. Segmentación de fondos en Isla Tesoro.

Tipo de sustrato	Área (ha)	Área (%)
Fondos arenosos	58,6	24,3
Formaciones coralinas	175,4	72,8
Formaciones coralinas o derrubios	6,9	2,8
Total	240,9	100

Tabla 4. Extensión de los sustratos interpretados en la zona 1.

En esta área predominan las formaciones coralinas (72,8%) entre las profundidades de 6 y 50 m, incluyendo aquellas encontradas en terrazas y laderas (Tabla 4.), y se encuentra fondos arenosos (24,3%) en áreas con profundidad

mayor a los 40 metros. En la base de las laderas se identificaron fondos como formaciones coralinas o derrubios (2,8%) posiblemente asociados a bloques independientes de origen coralino.

A continuación se describen los sitios de comprobación realizada con buceo G0 y G1 en la figura 36.

Estación G0: Esta zona se encuentra conformada por una planicie arrecifal de 17 m de profundidad, bastante heterogénea, de gran amplitud y la cual no presenta sedimento arenoso descubierto. Esta planicie compuesta principalmente por un sustrato combinado entre coral vivo y escombros de coral muerto fracturado, domina la planicie y esta colonizada principalmente por algas coralinas costrosas y algunas esponjas tubulares (Fig. 33A). Entre los corales vivos se encontraron grupos incrustantes y foliáceos, principalmente del género *Agaricia*, así como una gran variedad de octocorales de tipo látigo.

Adicionalmente se observaron agrupaciones dispersas de algas calcáreas ramificadas del genero *Halimeda*, que crecen usualmente en depresiones someras y agrietadas como las encontradas en esta zona. Las hojas calcificadas de estas algas son consideradas importantes fuentes de carbonato de calcio en los sistemas de arrecife de coral y a su vez alimentan los depósitos de arena asociados a estos [35].

En el borde este de la terraza se encontraron mosaicos de sustrato similares a la zona central de la terraza, sin embargo en este punto se observó que el sustrato persiste hacia una depresión de pendiente media hasta llegar a un parche de arena con algunos bloques dispersos (Fig. 33B).

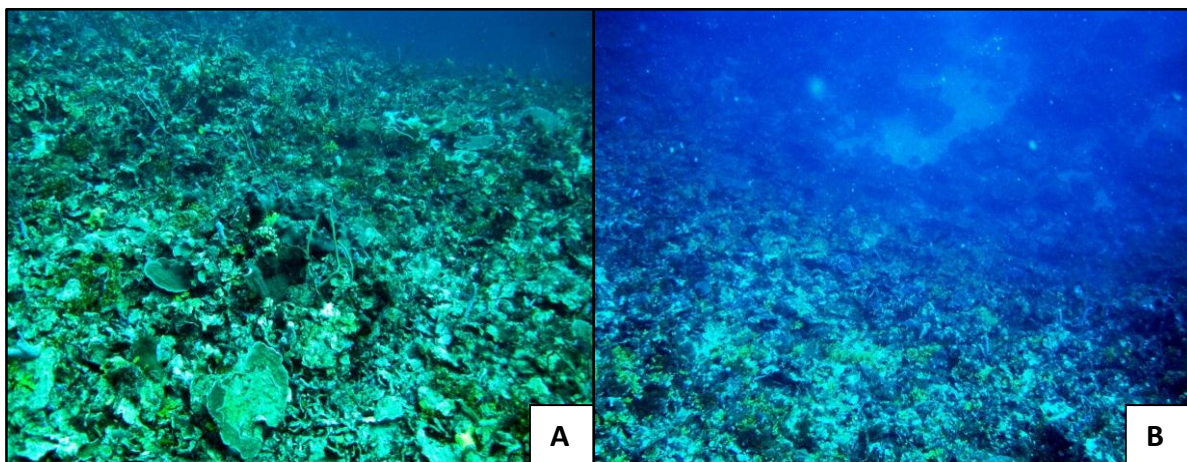


Figura 37.A) Apariencia del fondo de la terraza arrecifal y B) zona de depresión continúa con parche arenoso profundo, fotografías suministradas por INVEMAR.

En la sección norte de la terraza se encontró un borde de pendiente suave (Fig. 34A) donde el sustrato de base siguió siendo el mismo, sin embargo en esta zona se observó que por encima de los fragmentos de coral, la cantidad de esponjas tubulares y de gorgonáceos aumentó, esto posiblemente debido a la alta cantidad de materia orgánica suspendida que se observó en el medio (Fig. 34A).

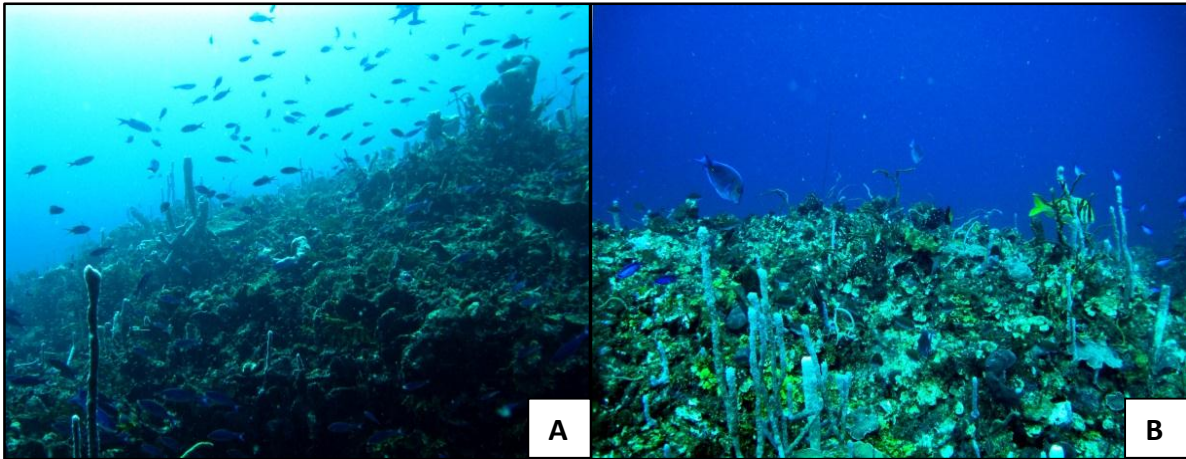


Figura 38. A) Pared de la terraza arrecifal con pendiente suave y B) mosaico estructural del borde Norte de la terraza arrecifal, fotografías suministradas por INVEMAR.

Estación G1: Es una planicie que no presenta sedimento arenoso descubierto y comprende la parte alta de una pared que bordea un cono de aproximadamente 50 m de diámetro. Presenta una topografía bastante irregular, cubierta de escombros de coral muerto que son colonizados y usados como sustrato por algas calcáreas del genero *Halimeda* y *Dictyota* (Fig. 35A).

Se observó en la zona Norte una asociación entre algas ramificadas y algunas algas tubulares del genero *Galaxaura*, las cuales habitan generalmente sustratos rocosos en parches de arrecifes someros [35] predominando sobre las colonias dispersas de coral que se observaron.

En la zona sur del cono, la cobertura de coral vivo aumentó un poco, observándose corales de los géneros *Agaricia* y *Porites*, entre otros, junto a unidades de esponjas tubulares y de tapete dispersas (Fig. 35B).

La sección de la pared que conduce a un depósito arenoso semicontinuo de 30 m de profundidad (estimación visual) y de pendiente pronunciada, se encontró

cubierta principalmente de escombros de coral muerto colonizados por algas calcáreas del género *Halimeda* y algunos corales foliáceos del género *Undaria* (Fig. 36A), hasta llegar a una planicie interna del cono donde se observaron parches discontinuos de arena (Fig. 36B).

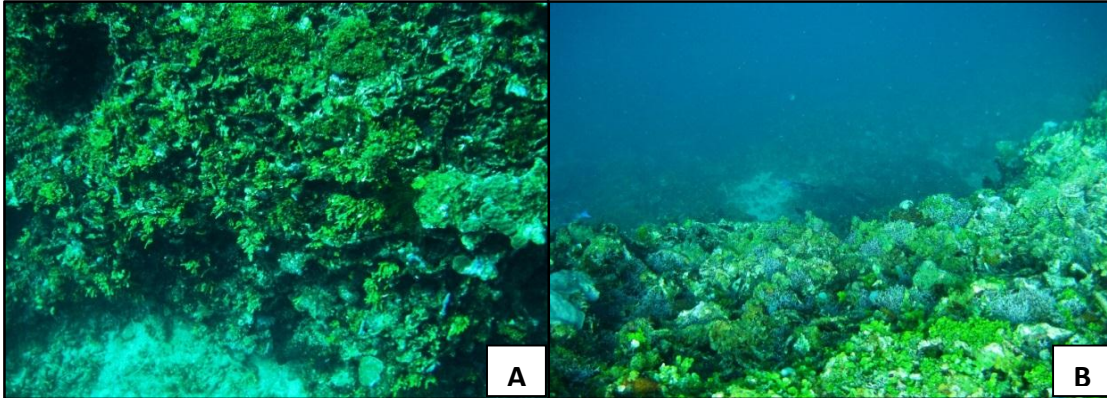


Figura 39. A) Planicie angosta que bordea la pared del cono y B) borde superficial del cono, fotografías suministradas por INVEMAR.

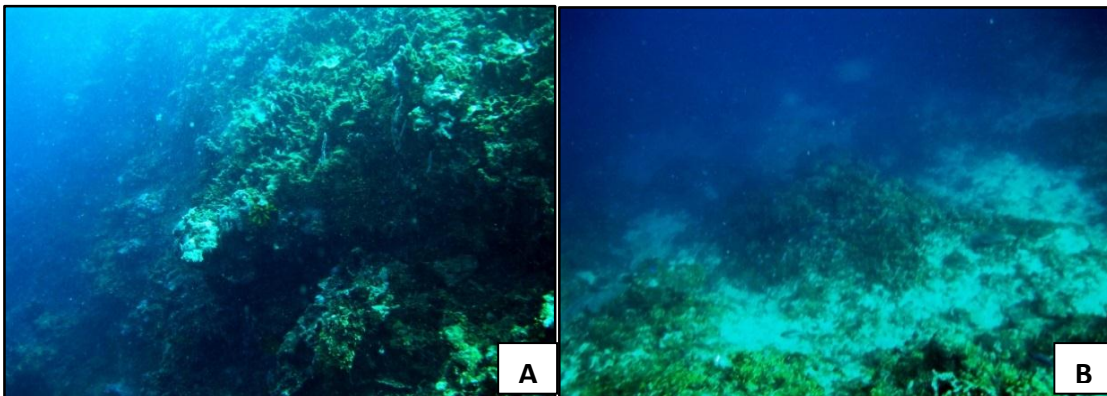


Figura 40. A) Pared del cono arrecifal con pendiente pronunciada y B) Planicie interna del cono con parches discontinuos de arena, fotografías suministradas por INVEMAR.

Se puede observar que las muestras tomadas en la estación G0 y G1 corresponden con formaciones coralinas obtenidas por el sistema de clasificación a partir de la RNA desarrollada en este trabajo de investigación, además en la estación G1 se observa una combinación entre coral y parches de arena determinado por la sensibilidad del sistema de clasificación como se aprecia en el anexo1.

6.2. Zona 2: Suroccidente de Isla Rosario

La adquisición de esta zona se realizó a 1.4 km al suroccidente de la Isla Rosario, comprendiendo un área de 161,5 ha. El lado occidental de esta zona presenta una terraza de baja pendiente entre 23 y 26 m de profundidad, posterior a los 27 m aumenta la pendiente a 20° hacia el oriente hasta alcanzar una profundidad de 45 a 50m como se observa en la figura 41. A mayor profundidad el fondo presenta un relieve irregular debido a la presencia de montículos asociados a formaciones coralinas, que se mantienen por encima de los 55 m aproximadamente. A profundidades mayores de 55 m el fondo está conformado por una planicie de fondo sedimentario no consolidado, probablemente arenoso.

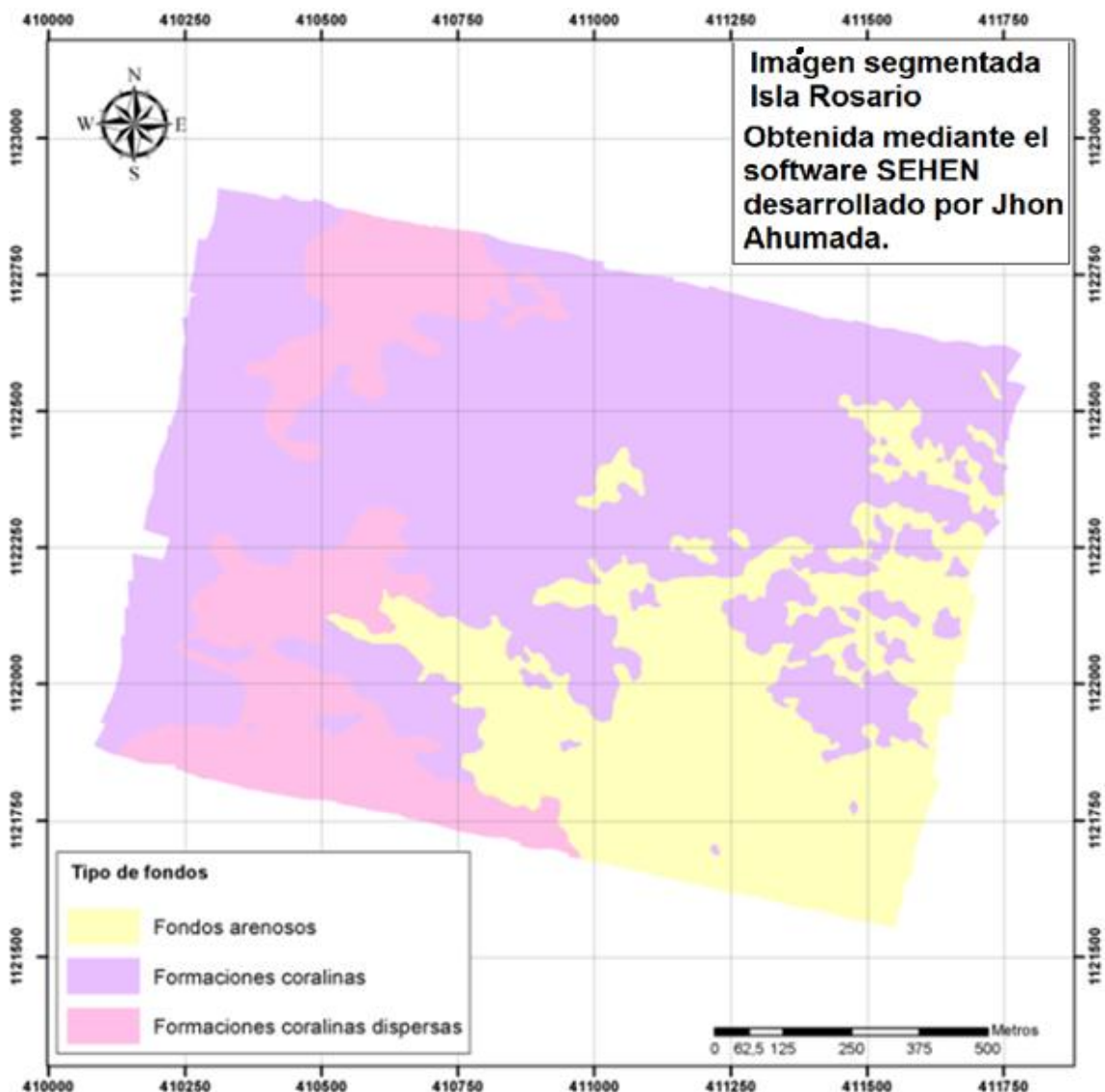


Figura 41. Segmentación de fondos en Isla Rosario.

En esta zona predominan las formaciones coralinas (55,7%) asociadas a las zonas de laderas y a los fondos irregulares de baja pendiente, debido a que son

zonas de mayor profundidad no se tiene un registro detallado de las comunidades coralinas que allí se encuentran. Se diferencia por tener una menor reflectividad las formaciones coralinas dispersas o en parche (16,9%) y en zonas de baja pendiente o depresiones la presencia de fondos arenosos (27,4%).

En esta zona no se realizó comprobación de los fondos en campo debido a que el área registrada presentó profundidades mayores a 25 m, lo cual restringe la actividad de buceo somero.

Tipo de sustrato	Área (ha)	Área (%)
Fondos arenosos	44,2	27,4
Formaciones coralinas	90,0	55,7
Formaciones coralinas dispersas	27,3	16,9
Total	161,5	100

Tabla 5. Extensión de los sustratos interpretados en la zona 2.

Debido a que en la zona Isla Rosario no se pudo comprobar la efectividad del clasificador, los resultados se validaron mediante inspección visual de un experto, más adelante, en la sección 6.4 se evalúa el desempeño del sistema de clasificación sometido a imágenes mayormente obtenidas de la Isla Rosario, con el fin de determinar el porcentaje de eficiencia de la plataforma de clasificación,

6.3. Zona 3: Sur de Isla Arena

En la figura 42 se aprecia la segmentación de Isla Arena, por ser la zona que presenta mayor diversidad de fondos y en promedio la profundidad más baja comparada con Isla Rosario y Tesoro, se realizó el mayor número de comprobaciones.

Para esta zona se tomaron los registros en un área de 228,7 ha ubicada 150 metros al sur de Isla Arena, el fondo presentó baja pendiente, con aparición aislada de depresiones. En dirección al sur la profundidad aumenta levemente, hasta llegar a un quiebre hacia una pendiente de 10° con aumento de profundidad desde los 15 hasta llegar a 25 – 30 metros.

Esta zona se destaca por la presencia de arrecifes de parche zonificados acá como formaciones coralinas dispersas (51,9%), asociadas a bloques con corales predominantes sobre un fondo arenoso. Hacia el norte y en profundidades menores a los 5 m, la cantidad de bloques en el fondo arenoso disminuye en un área que representa el 18,5% de esta zona, y se diferencia de los fondos arenosos

poblados por fanerógamas (4,5%) debido a que este último presenta mayor reflectividad en la imagen mosaico. En la parte nororiental de esta zona y asociados a la formación de un valle que alcanza profundidades de 25 m se encuentra una formación arrecifal con mayor rugosidad clasificada como formaciones coralinas en terrazas (1,8%).

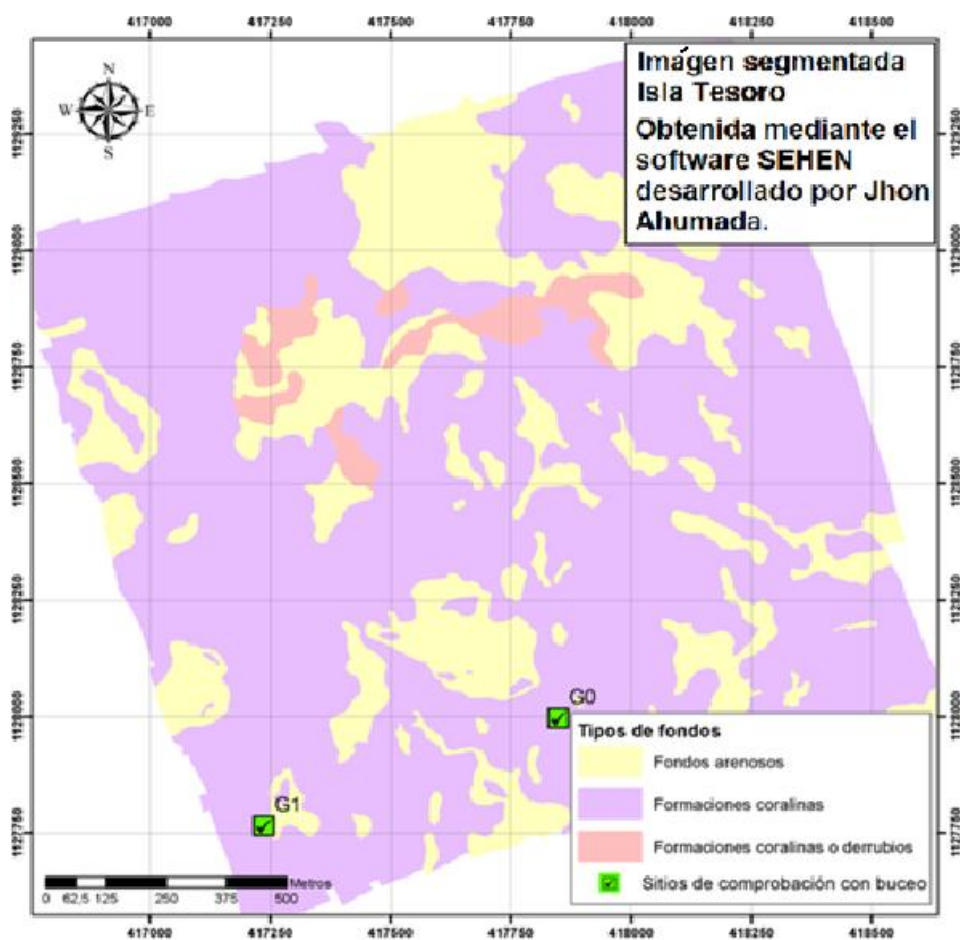


Figura 42. Segmentación de fondos en Isla Arena.

Tipo de sustrato	Área (ha)	Área (%)
Fondo arenoso poblado por fanerógamas	10,3	4,5
Fondos arenosos	42,3	18,5
Formaciones coralinas	53,4	23,3
Formaciones coralinas dispersas	118,7	51,9
Formaciones coralinas en terrazas	4,1	1,8
Total	228,8	100

Tabla 6. Extensión de los sustratos interpretados en la zona 3.

A partir de las observaciones vistas en campo en las 7 estaciones escogidas (G2 a G8) de la zona 3 (figura 38 y tabla 6), se describen a continuación los principales detalles observados en campo mediante el análisis de la información tomada y de las fotografías tomadas del relieve y de la composición ecológica y paisajística.

Estación G2: Esta estación está representada por una planicie de sustrato arenoso bioclástico asociado con fanerógamas de las especies *Thalassia testudinum* y *Syringodium filiforme* (Fig. 39). A lo largo de la planicie se encontraron además algunos bloques individuales de aproximadamente 1 m de diámetro, que al parecer son esqueletos muertos de corales masivos que han sido colonizados por grupos de esponjas variadas, gusanos tubícolas y algunas algas filamentosas y de tapete (Fig. 40A). Además se observan algunos relictos de corales masivos del género *Siderastrea* (Fig. 40B).



Figura 43. Praderas semicontinuas de pastos marinos de las especies *Thalassia testudinum* y *Syringodium filiforme* sobre sustrato de origen bioclástico, fotografías suministradas por INVEMAR.

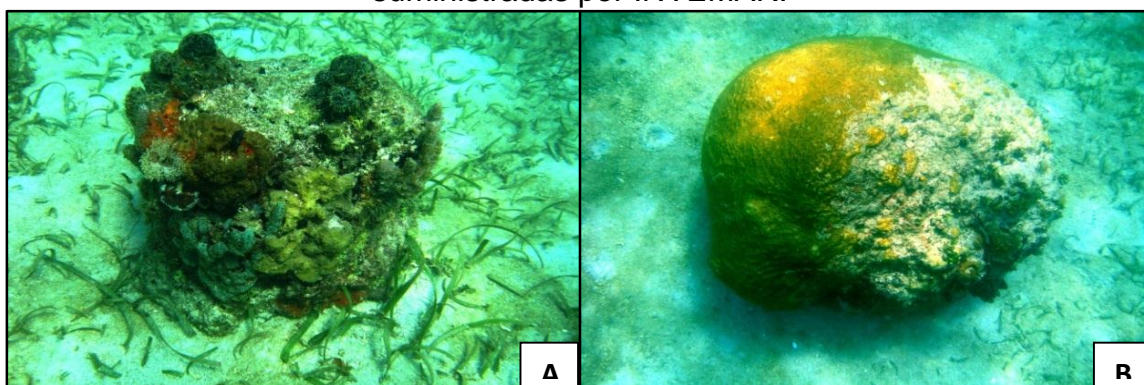


Figura 44. A) Bloque de coral muerto colonizado por variedad de esponjas e invertebrados y B) Coral masivo del género *Siderastrea* en condiciones regulares, fotografías suministradas por INVEMAR.

Estación G3: Está representada por un complejo arrecifal disperso, de 10 a 15 m de profundidad, donde se encuentran formaciones interrumpidas de arrecifes masivos en forma de domos irregulares de los géneros *Montastrea*, *Stephanocoenia*, *Siderastria* y *Diploria*, así como de corales incrustantes de los géneros *Porites* y *Mycetophyllia* (Fig. 41A). Entre estas formaciones se encontraron agrupadas esponjas ramificadas e incrustantes. El cascajo de coral muerto, junto con la arena del fondo forman parches semicontinuos descubiertos entre las formaciones de coral (Fig. 41B).

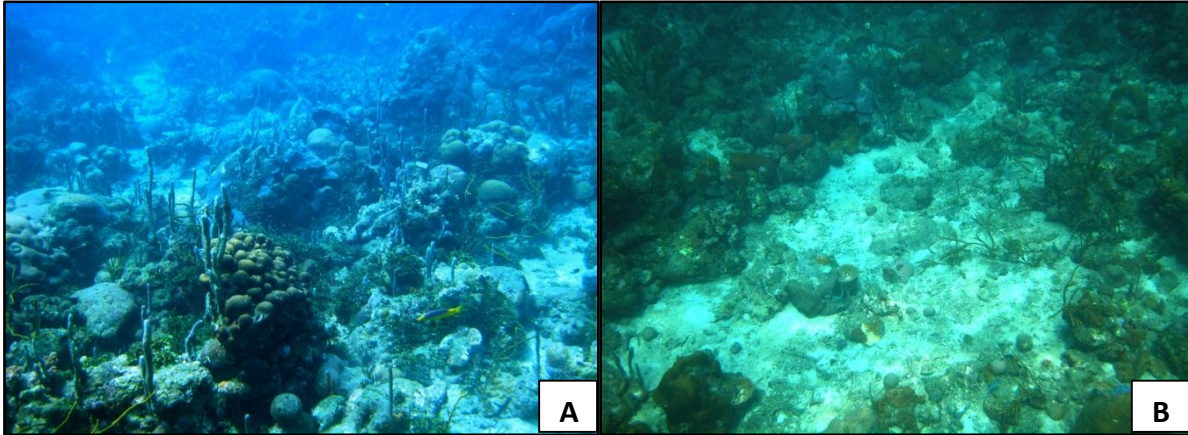


Figura 45. A) Mosaicos de formaciones arrecifales en la zona y B) Vista superior de la zona arrecifal y de parches de material bioclástico, fotografías suministradas por INVEMAR.

Adicionalmente se observó entre los corales masivos, algunos restos de corales muertos del mismo tipo, colonizados por algas calcáreas del género *Halimeda* (Fig. 42A). En dirección Sur, se encontró una pared irregular de aproximadamente 45° de pendiente, colonizada por corales y esponjas, la cual desciende hasta una profundidad de 25 m (estimación visual) (Fig. 42B).

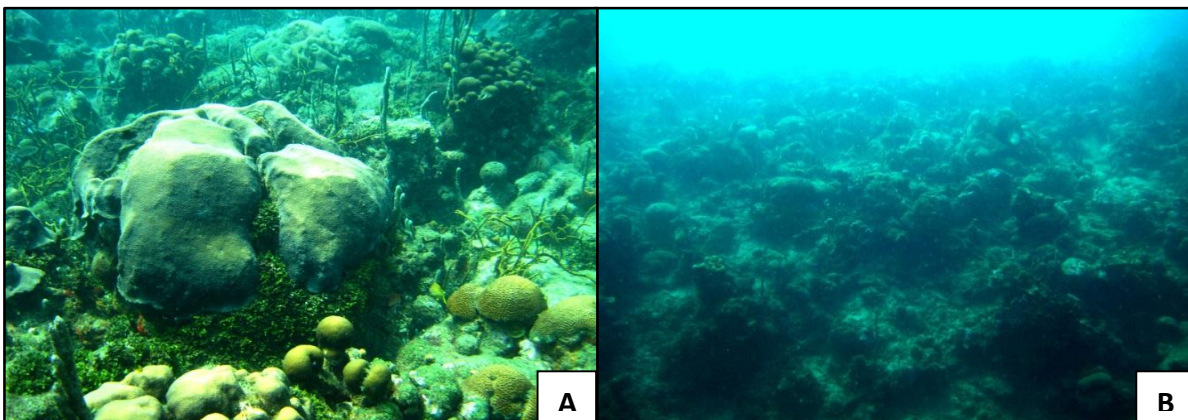


Figura 46. A) Agregación de corales, algas y esponjas y B) Pared irregular colonizada por corales y esponjas, fotografías suministradas por INVEMAR.

Estación G4: En esta estación se encuentra una planicie de 10 m de profundidad, la cual alberga colonias de algas calcáreas frondosas de los géneros *Halimeda* y *Dictyota*, así como corales incrustantes y foliáceos de los géneros *Agaricia* y *Undaria*, asociadas con algunas esponjas tubulares y de tapete. Se observó que el sustrato matriz sobre el cual reposan estos organismos son esqueletos y cascajo de corales (Fig. 43A).

En dirección Norte se observa una depresión suave que comienza con una franja de algas ramificadas y corales foliáceos (Fig. 43B), hasta llegar a una zona más profunda (15 - 20 m) donde se encuentran colonias de coral discontinuas rodeadas de parches de arena calcárea (Fig. 44A). Los domos y estructuras coralinas se componen de esqueletos de coral colonizados por algas costrosas y de tapete, así como de gran variedad de esponjas tubulares. Los corales vivos masivos encontrados, corresponden a los géneros *Siderastrea*, *Diploria*, *Agaricia* y *Montastrea*, asociados con algunos gorgonaceos de tipo vara y látigo (Fig. 44B).

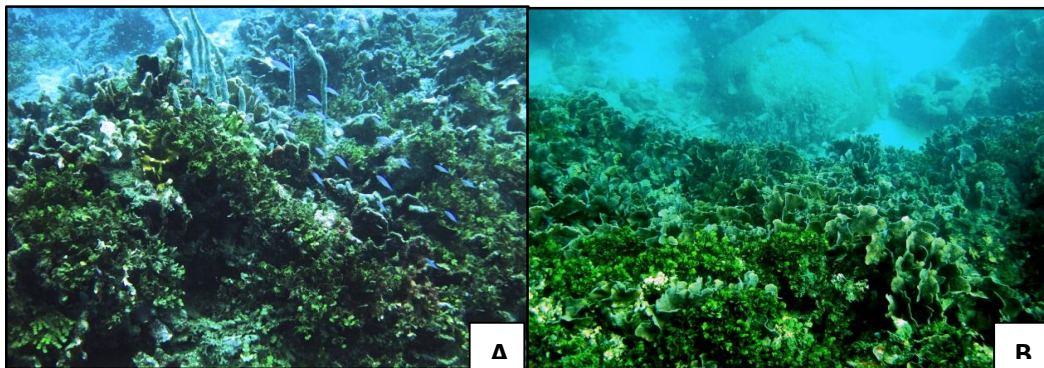


Figura 47. A) Agregación de corales, algas y esponjas y B) Pared irregular colonizada por corales y esponjas, fotografías suministradas por INVEMAR.

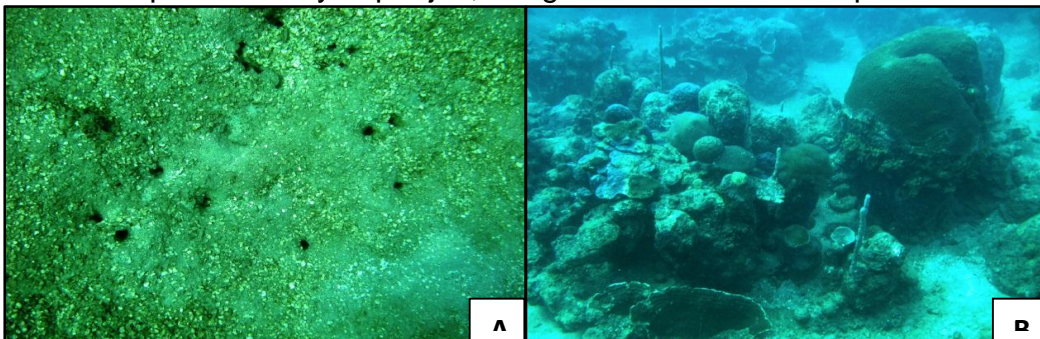


Figura 48. A) Sustrato arenoso bioclástico modificado por organismos bioturbadores bentónicos y B) Estructuras coralinas rodeadas de parches arenosos pequeños, fotografías suministradas por INVEMAR.

Estación G5: En esta zona se encontró una planicie de 8 a 10 m de profundidad donde sobresale un sustrato arenoso calcáreo con presencia de algunos bloques dispersos de esqueletos de coral sobre los cuales se encuentran colonias de esponjas, algas, gorgonaceos y grupos de corales varios, dentro de los cuales se identificaron los géneros *Agaricia*, *Porites*, *Diploria*, *Mycetophylla*, *Montastrea* y *Millepora* (Fig. 45A). Se observó que en dirección Este, el número de bloques coralinos aumenta y siguen teniendo una estructura individual dominados principalmente por *Montastrea sp.* (Fig. 45B).

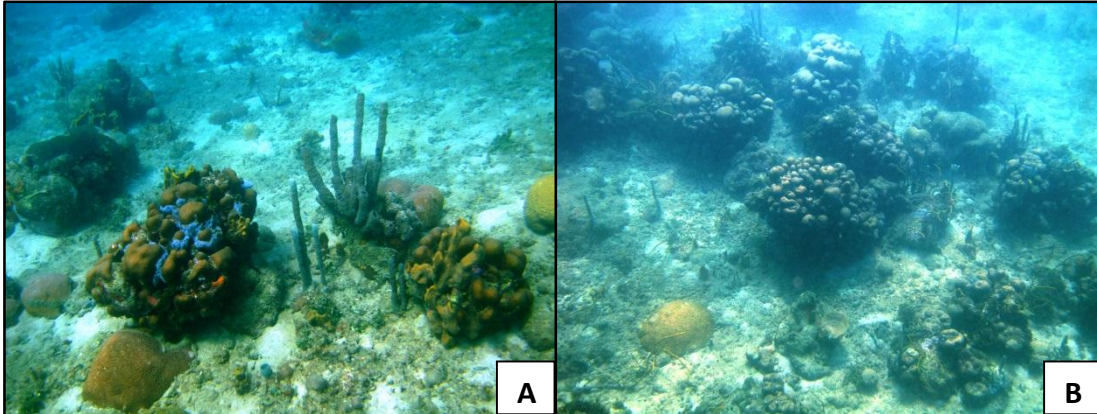


Figura 49. A) Bloques dispersos de esqueletos de coral sobre los cuales se encuentran colonias de esponjas, algas, gorgonaceos y corales varios y B) Presencia y aumento de bloques de coral variados, fotografías suministradas por INVEMAR.

Estación G6: Representa una terraza amplia de 10 m de profundidad, con sustrato constituido principalmente de arena calcárea y cascajo de coral sobre el cual crecen esponjas pequeñas, colonias de algas coralinas, filamentosas y de tapete, las cuales no se agrupan de forma masiva (Fig. 46).

Hacia el costado Este de la terraza se observaron formaciones de esponjas de mayor tamaño, así como de corales masivos dispersos principalmente de los géneros *Colpophyllia*, *Dichocoenia*, *Montastrea* y *Diploria*. En este punto el relieve de fondo es más complejo y se observa que aumenta la densidad de formaciones arrecifales, sin embargo no se dan cambios de pendiente y se mantiene relativamente plana la terraza (Fig. 47).



Figura 50. Terraza con restos de coral muerto y cascajo colonizado por algas, esponjas y corales de pequeño tamaño, fotografías suministradas por INVEMAR.



Figura 51. Terraza con restos de coral muerto y cascajo colonizado por algas, esponjas y corales de pequeño tamaño, fotografías suministradas por INVEMAR.

Estación G7: Esta estación abarca una zona bastante fragmentada y presenta un relieve compuesto por esqueletos de coral masivo colonizado por algas calcáreas y esponjas. La topografía refleja la presencia de canales arrecifales separados por parches semicontinuos de arena coralina, entre los cuales los domos irregulares de coral muerto forman algunas cuevas y grietas (Fig. 48). Entre los montículos de coral se observaron colonias de algas calcáreas de los géneros *Halimeda* y *Dictyota*. Los corales vivos masivos corresponden a los géneros *Siderastrea*, *Diploria*, *Agaricia*, *Montastrea* asociados con algunos gorgonáceos de tipo vara y látigo.



Figura 52. Terraza con restos de coral muerto y cascajo colonizado por algas y esponjas, con presencia de algunos colares vivos, fotografías suministradas por INVEMAR.

Estación G8: Esta estación comprende una plataforma arrecifal somera de aproximadamente 5 a 10 m, compuesta principalmente por colonias diversas de coral vivo de gran tamaño, principalmente de los tipos masivos, incrustantes, foliáceos y millepóridos. Los mosaicos de coral están principalmente compuestos de organismos de los géneros *Agaricia*, *Porites*, *Diploria*, *Mycetophylla*, *Montastrea* y *Millepora*, asociados con presencia de gorgonáceos y esponjas foliáceas y tubulares (Fig. 49)



Figura 53. Plataforma arrecifal somera, compuesta principalmente de colonias diversas de coral vivo asociadas con gorgonáceos y esponjas foliáceas y tubulares, fotografías suministradas por INVEMAR.

Entre los domos de coral existen algunos remanentes de coral muerto, los cuales se encontraron colonizados por algas de los géneros *Halimeda* y *Dictyota*. La

complejidad del relieve está dada por el crecimiento masivo de los corales, sin embargo se observaron parches circundantes de arena bioclástica (Fig. 50)



Figura 54. Terraza arrecifal con crecimiento masivo de corales combinados con mosaicos de esponjas y algas, fotografías suministradas por INVEMAR.

Con estas exploraciones se verifica la clasificación presentada en la figura 42 donde las muestras fotográficas corresponden con la segmentación desarrollada por el sistema experto, a continuación se plantea un método de evaluación alternativo, considerando las zonas con mayores complicaciones debido a los cambios de ganancia en las distintas zonas de escaneo.

Para zonas mayores a 10 metros el programa arrojó una precisión mayor a 90% y la comprobación de campo coincidió en todos los casos verificados, además los errores presentes en este desarrollo se pueden asociar a las fronteras entre sustratos o al borde de las imágenes, esto es porque durante la segmentación se consideró una máscara de 9 x 9 píxeles, superando la resolución mínima de las imágenes correspondientes a 8 píxeles por metro y con un error de 1,125 metros.

Si bien el análisis no alcanza a discriminar diferencias entre la cobertura de coral vivo o muerto como el registrado en la estación G6, es posible que al considerar más características discriminantes en el sistema artificial de clasificación y así poder diferenciar con una mayor resolución diferencias entre las mismas poblaciones de coral, además de los gradientes de concentración de sustratos.

6.4. Evaluación del desempeño mediante simulación.

Además de la comprobación *in-situ* con los buceos someros del sistema experto implementado se simuló las respuestas del clasificador con segmentos de las imágenes acústicas plenamente conocidos y mayormente correspondientes a Isla

Rosario, debido a que en esta zona no se pudo realizar comprobación *in-situ*, en la tabla 7 se muestran los resultados del sistema experto para las 4 clases, con un total de 10 muestras.

Las imágenes adquiridas en las muestras fueron tomadas de las zonas donde se presentó más errores durante la adquisición de las imágenes con el SSS, correspondientes al suroccidente de Isla Tesoro, nororiente de Isla Rosario y norte de Isla Arena mostrados en la figura 55.

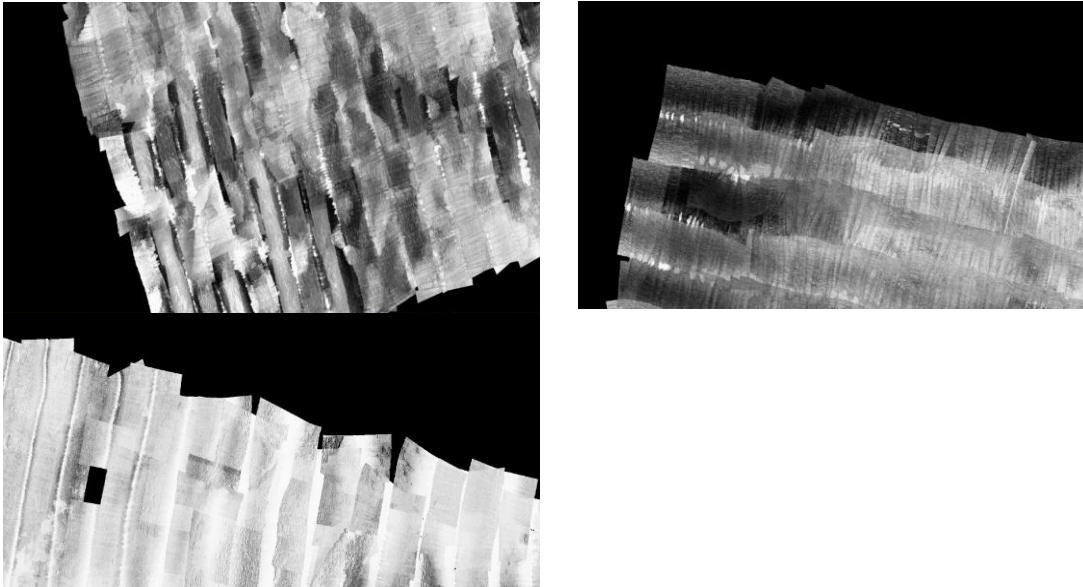


Figura 55. Segmentos de toma de muestras para comprobación.

Muestra control	Sustrato - muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	Coral	20	20	10	10	20	20	20	20	20
15	Pastos marinos	25	15	25	15	15	15	0	15	15
25	Arena	25	25	25	25	25	25	25	0	0
10	Coral disperso	10	10	20	10	10	10	0	10	10
0	Desconocido									

Tabla 7. Resultados del sistema experto para las 5 clases.

Para un total de 40 muestras se marcan 9 incorrectas para un error de 22.5%, es notable la confusión entre los sustratos correspondientes a coral y coral disperso, debido a que estos tipos de sustratos tienen características muy similares, además las densidades superficiales de coral sobre las áreas escaneadas, no es continuo, otro de los factores que ayudo a incrementar el error es que los segmentos de comprobación tenían zonas de saturación, donde se perdía la continuidad textural y no se podía realizar una correcta segmentación, por otro lado los segmentos

identificados con mayor precisión correspondientes a los sustratos arenosos presentan un error del 20% a pesar de la zona usada para este análisis.

Una de las grandes ventajas obtenidas con este método de optimización y clasificación de imágenes acústicas, es la reconstrucción de las imágenes a partir de la continuidad textural, reflejando una mejor clasificación de las zonas donde se encontraba el nadir, también se determinó con el desarrollo de esta plataforma variaciones en la composición de los sustratos que de otra forma no se podrían determinar por el experto humano.

El tiempo empleado para lograr la clasificación de los diferentes sustratos es mucho menor al requerido por un experto humano disminuyendo de 4 horas a 40 minutos, con la ventaja de no presentar grandes errores en las imágenes clasificadas y una alta repetitividad.

Con el desarrollo de este proyecto se tendrá la posibilidad de extrapolar los resultados a todo el litoral caribe y pacífico colombiano, con la ventaja de minimizar el tiempo de clasificación y de no requerir personal de altas capacidades para su manejo.

7. CONCLUSIONES.

El desarrollo de los algoritmos basados en filtros de Gabor en las texturas de las imágenes acústicas junto con la red neuronal artificial y los mapas de profundidad para la clasificación de fondos marinos aumentan la eficiencia en la discriminación y clasificación de los diferentes sustratos.

La supresión del nadir en la etapa previa en el procesamiento, proporciono una continuidad textural en las imágenes acústicas, facilitando los procesos

posteriores de segmentación textural y clasificación con redes neuronales artificiales.

La segmentación resultado del proceso de la herramienta de reconstrucción, evidencia una mayor discriminación de los tipos de fondo comparados con la segmentación realizada por un experto, y esta puede estar relacionada con cambios en la composición biótica del sustrato o el material sedimentario.

La diferenciación de los distintos sustratos marinos realizada por el sistema, permitió generar un mapa acorde con los datos reales, brindando un mejor apoyo en la caracterización geológica y geomorfológica del PNNCRSB.

Al verificar la información obtenida del análisis y la clasificación de las imágenes acústicas, con las observaciones y fotos tomadas en campo, se comprobó que la clasificación hecha con la RNA corresponde con las descripciones y características generales de las estaciones escogidas y refleja a nivel general las condiciones estructurales reales del fondo.

El desarrollo de esta plataforma es de gran importancia para la cartografía submarina del territorio colombiano, debido a que con gran rapidez y eficiencia en la clasificación de sustratos, se pueden monitorear los cambios ambientales en los litorales del caribe y del pacífico colombiano.

8. TRABAJOS FUTUROS.

Analizar imágenes acústicas donde se encuentren sustratos marinos diferentes a los presentados en el PNNCRSB.

Incorporar el modelo de profundidades de la zona escaneada, con el fin de segmentar no solo los sustratos marinos si no, los accidentes geográficos como acantilados, terrazas o derrubios entre otros.

Crear un histórico con imágenes acústicas de una zona, con el fin de detectar, cuantificar los cambios y verificar tendencias de evolución de los sustratos marinos.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] J D Penrose, P J W Siwabessy, A Gavrilov. Acoustic Techniques for Seabed Classification, Cooperative Research Centre for Coastal Zone Estuary and Waterway Management.
- [2] *Quiky B*, Elementos de automatización, 2005
- [3] Caballero Sánchez J, Cartografía submarina, Universidad politécnica de Madrid.
- [4] De la Rosa, E. | Ingeniería de las Ondas
http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io7/public_html/bat2.html fecha de acceso 5 de mayo de 2013.
- [5] Paul C. Etter, Underwater Acoustic Modeling, second edition, 1996.
- [6] Leroy, C.C., Robinson, S.P., and Goldsmith, M.J. 2008. A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans. J. Acoust. Soc. 2008

- [7] Ainslie, M.A. Principles of Sonar Performance Modeling, Springer, New York. 2010
- [8] Alvarez, A., Harrison, C., and Siderius, M. Predicting underwater ocean noise with genetic algorithms. Phys. Lett. 2001.
- [9] Browning, D.G., Christian, R.J., and Petitpas, L.S. A global survey of the impact on acoustic propagation of deep water warm core ocean eddies. 1994
- [10] Buckingham, M.J., Potter, J.R., and Epifanio, C.L. Seeing underwater with background noise. Sci. Am. 1996.
- [11] Lurton, X. (2002): An introduction to underwater acoustics. Principles and applications. - 347 p.; London (Springer).
- [12] Fish, J.P. and Carr, H.A. (1990): Sound underwater images. A guide to the generation and interpretation of side scan sonar data. - 188 p.; Orleans (Lower Cape Publishing).
- [13] Mazel, C. (1985): Side scan sonar record interpretation. - Salem (Klein Associates Inc.).
- [14] Fish, J.P. and Carr, H.A. (1990): Sound underwater images. A guide to the generation and interpretation of side scan sonar data. - 188 p.; Orleans (Lower Cape Publishing).
- [15] EGAN. Walter G. Optical Remote Sensing: Science and Technology. MARCEL DEKER INC. 2004.
- [16] Blondel, P. and Murton, B.J. (1997): Handbook of seafloor sonar imagery. - 314 p.; Chichester (Wiley).
- [17] Davis, K.S., Slowey, N.C., Stender, I.H., Fiedler, H., Bryant, W.R. and Fechner, G. (1996): Acoustic backscatter and sediment textural properties of inner shelf sands, northeastern Gulf of Mexico. - Geo-Marine Letters, 16 (3): 273-278; Berlin.
- [18] Kossoff G. Basic physics and imaging characteristics of ultrasound. World J Surg 2000; 24:134-42.
- [19] NOAA Office of Coast Survey, <http://www.nauticalcharts.noaa.gov/hsd/SSS.html>, fecha de acceso 5 de mayo de 2013.
- [20] HIDDE(N)VISUALS, <http://www.seascape.nl/support/sidescan-sonar>, fecha de acceso 5 de mayo de 2013.
- [21] INNOMAR Technologie GmbH, <http://www.innomar.com/ses2000compact.php>, fecha de acceso 5 de mayo de 2013.
- [22] LIRA C., Jorge, Introducción al tratamiento digital de imágenes. Instituto Politécnico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica, México. ISBN 970-32-0091-5. 1ra Edición. (2002).
- [23] Sapiro Guillermo, Image Inpainting, from SIAM News, Volume 35, Number 4
- [24] Sooraj Bhat, <http://www.cc.gatech.edu/~sooraj/inpainting>, fecha de acceso 5 de mayo de 2013.
- [25] GONZÁLEZ, R. C. y WOODS. *Digital Image Processing*. Singapore, Pearson Education. 2004.
- [26] JAIN, A. K. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice Hall. 1989.

- [27] OzCoasts (Geociencia Australia), http://www.ozcoasts.gov.au/geom_geol/toolkit/Tech_CA_sss.jsp, fecha de acceso 5 de mayo de 2013.
- [28] John G. Daugman, Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters, February 12, 1985
- [29] BODNAROVA, A., BENNAMOUN, M. & LATHAM, S.. *Optimal Gabor filters for textile flaw detection: Pattern Recognition*. 2002.
- [30] HSIAO, J. Y. & SAWCHUK A. A. *Unsupervised image segmentation using feature smoothing and probabilistic relaxation techniques*. En: *Comp. Vis. Graph. Image Proc.* 1989.
- [31] Perona and Malik, "Preattentive texture discrimination with early vision echanisms," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 7, No. 5, May 1990
- [32] A. K. Jain, F. Farrokhnia, "Unsupervised texture segmentation using Gabor Filters," *Pattern Recogni-tion*, vol. 24, no. 12, pp.1167-1186, 1991
- [33] De la Escalera Arturo, visión por computador Fundamentos y métodos, Pearson education S.A. Madrid, (2001).
- [34] CHUVIECO SALINERO, Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial. Rialp, Madrid. 3ra Edición. 1996.
- [35] LIRA C., Jorge, Introducción al tratamiento digital de imágenes. Instituto Politécnico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica, México. ISBN 970-32-0091-5. 1ra Edición. (2002).
- [36] T Delgado, F Gonzales, Jorge Hernandez, introducción a las redes neuronales, Sekit, (2004).
- [37] V Alcaraz, Estructura y función del sistema nervioso, segunda edición, Manual moderno (2001).
- [38] BISHOP, C. M.. Neural Networks for Pattern Recognition [tesis de maestría].
- [39] Perceptron multicapa, redes de neuronas artificiales. RAI - C3M, Redes de Neuronas Artificiales, <http://www.lab.inf.uc3m.es/~a0080630/redes-de-neuronas/perceptron-multicapa.html>, ultimo acceso, may. 5, 2013.
- [40] Castillo E, Gutiérrez J, Hadi A, sistemas expertos y modelos de redes probabilísticas, universidad de de Cantabria, (1998).
- [41] Humann, P. y DeLoach, N. 1996. Reef coral identification: Florida, Caribbean, Bahamas, including marine plants. New World Publications.
- [42] Solano, T. Diferenciación de coberturas vegetales mediante percepcion remota y procesamiento digital de imagines de muestras satelitales LANDSAT-/ ETM+ del cauca y verificación mediante datos in-situ, tesis de pregrado, 2011

10. Anexo 1

Cada una de las imágenes presentadas en las figuras 56, 57, y 58 están representando la evolución en el procesamiento de las imágenes con la plataforma desarrollada.

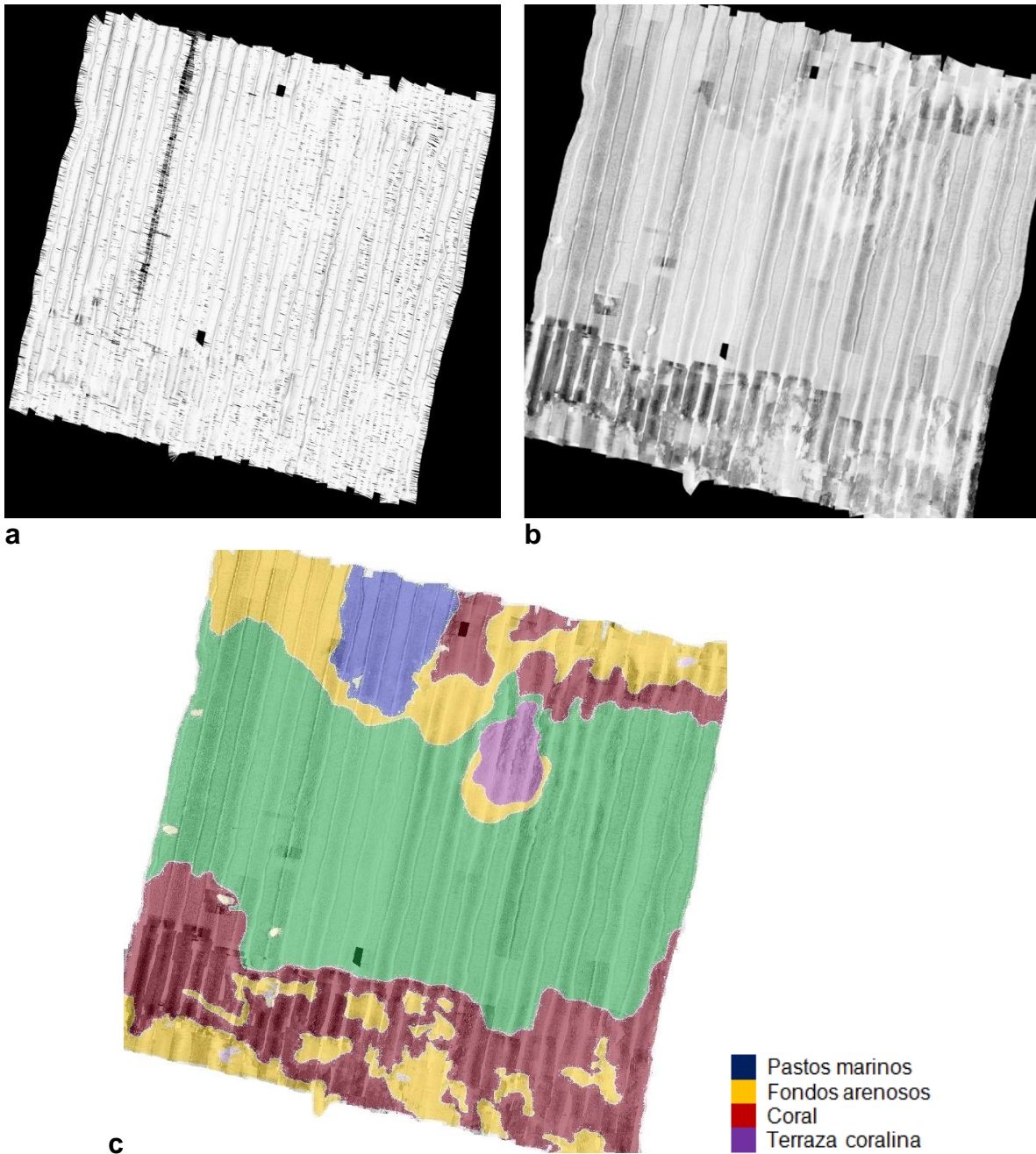
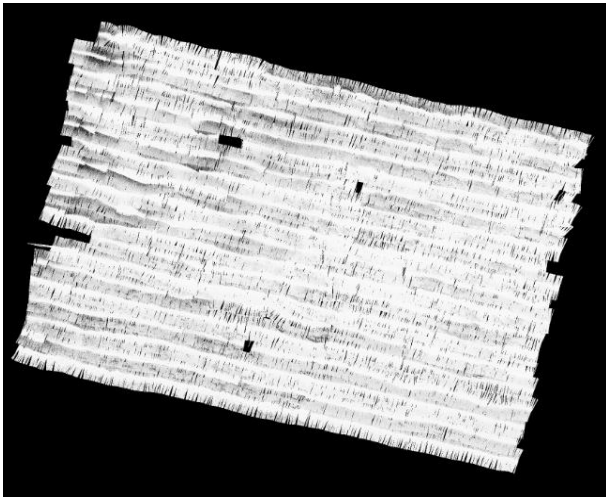
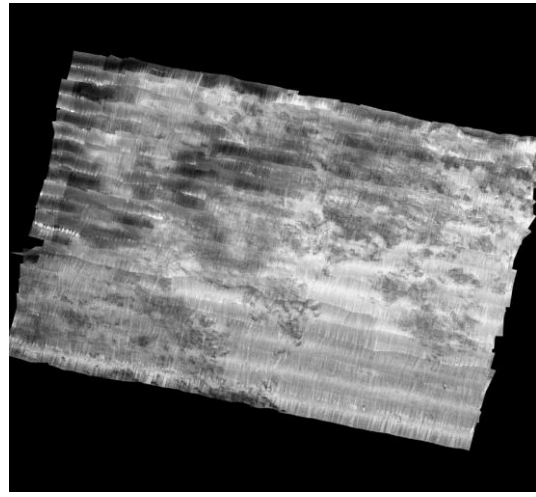


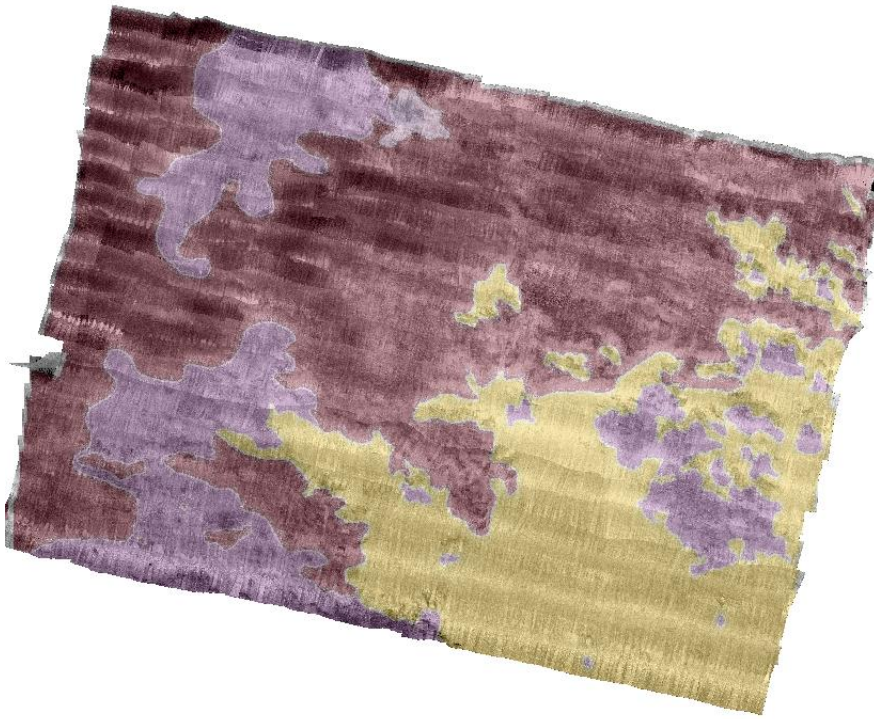
Figura 56. Etapas de procesamiento en el mosaico Isla Arena.



a



b



c




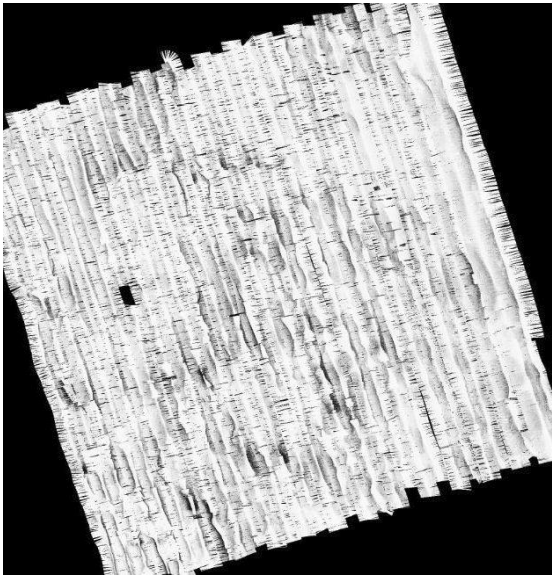
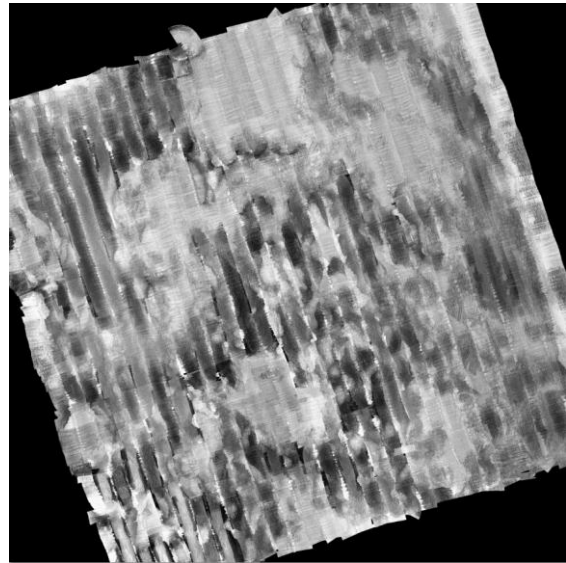
-  Fondos arenosos
-  Coral
-  Coral disperso

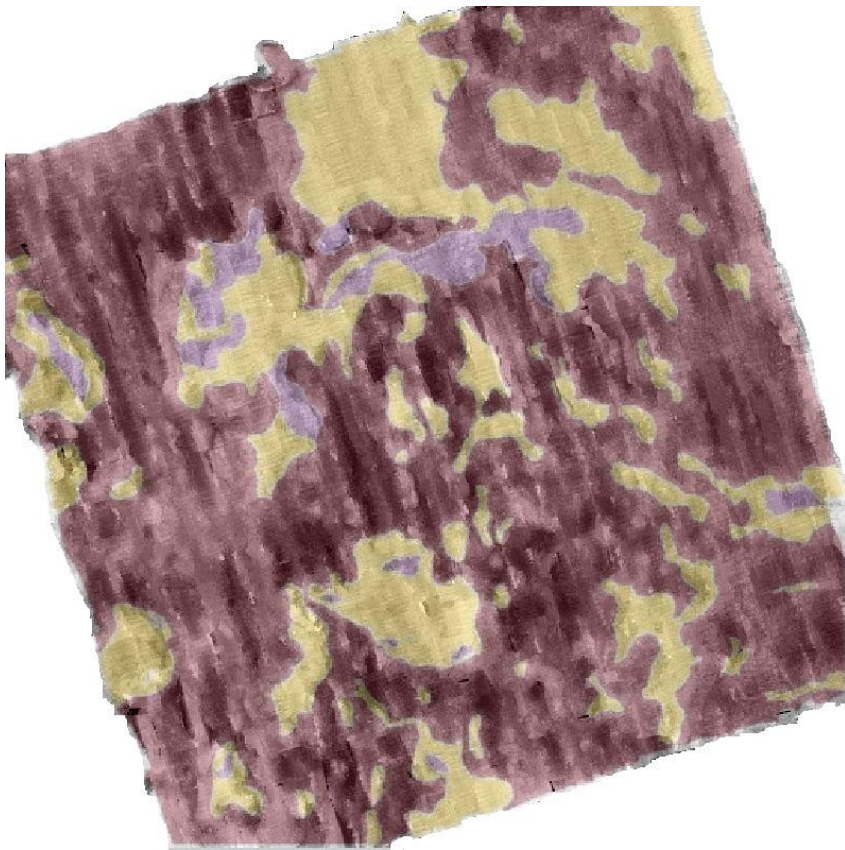
Figura 57. Etapas de procesamiento en el mosaico Isla Rosario



a



b



c

Fondos arenosos
Coral
Coral disperso

Figura 58. Etapas de procesamiento en el mosaico Isla Tesoro