



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

(GEOLOGÍA MARINA)

**ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DEL SISTEMA DE MACIZOS EN
ARRECIFES FRONTALES DEL INDO-PACÍFICO.**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

EDGAR MANUEL GARCÍA GARNICA

DIRECTOR DE TESIS: DR. PAUL ANDREW BLANCHON
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA (PUERTO MORELOS)

COMITÉ TUTORAL: DR. ERIC JORDAN DAHLGREN
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA (UNAM)

DR. JOAQUÍN RODRIGO GARZA PÉREZ
UMDI, FACULTAD DE CIENCIAS (UNAM)

DR. JUAN PABLO CARRICART GANIVET
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA (UNAM)

DR. SERGIO CERDEIRA ESTRADA
COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA
BIODIVERSIDAD (CONABIO)

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. Diciembre, 2016.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, de la cual he formado parte desde el bachillerato.

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, por otorgarme la oportunidad y abrirme las puertas.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme otorgado la beca No. 379276 para la realización de mis estudios de maestría.

Mi especial agradecimiento al Dr. Eric Jordan Dahlgren, por sus valiosas observaciones, recomendaciones y consejos a lo largo del desarrollo y culminación de la tesis de maestría.

A los miembros de mi comité tutorial, Dr. J. Rodrigo Garza Pérez, Dr. Juan Pablo Carricart Ganivet y Dr. Sergio Cerdeira Estrada, por haber revisado y recomendado observaciones durante la culminación de la tesis.

Al Dr. Paul Blanchon, por haberme permitido formar parte de su grupo de trabajo y haberme brindado las facilidades para mi estancia en las instalaciones estudiantiles del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología con sede en Puerto Morelos, Q. Roo.

A la M.C. Cecilia Barradas Ortiz, M.C. Fernando Negrete Soto, y M.C. Edgar Escalante Mancera, por los conocimientos teóricos y prácticos brindados en técnicas de buceo.

A la M.C. Rosa Elisa Rodríguez Martínez, por la información brindada para la utilización del software estadístico; a mis compañeros estudiantes del posgrado, M.C. Ricardo Cruz Cano, M.C. Leslie Cid, M.C. José Estrada, Biol. Sacnité Chávez, Biol. Nancy Escandón Flores, y Biol. Sandra Mendoza Quiroz, por su noble y desinteresado apoyo brindado durante mis salidas de campo en el arrecife. Y a todos los compañeros con quienes compartí de manera breve mi estancia de posgrado en el Caribe.

CONTENIDO

RESUMEN.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
1 ANTECEDENTES.....	10
1.1 INDO-PACÍFICO.....	10
1.1.1 OLEAJE EN EL INDO-PACÍFICO.....	10
1.1.2 CAMBIO DEL NIVEL DEL MAR EN EL INDO-PACÍFICO.....	12
1.1.3 CLIMA DE OLEAJE SOBRE EL ATOLÓN PUKA PUKA.....	13
1.2 FORMACIÓN Y CRECIMIENTO DE LOS ARRECIFES DE CORAL.....	15
1.2.1 SISTEMAS DE MACIZOS Y SURCOS DEL INDO-PACÍFICO.....	16
1.2.2 DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE MACIZOS Y SURCOS.....	18
1.3 PERCEPCIÓN REMOTA Y GOOGLE EARTH.....	19
1.4 ESTUDIOS PREVIOS DE LOS SISTEMAS DE MACIZOS Y SURCOS EN EL INDO-PACÍFICO.....	22
HIPÓTESIS.....	25
OBJETIVOS.....	25
2 MATERIAL Y MÉTODO.....	26
2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL Y FUNDAMENTACIÓN.....	26
2.2 DETECCION DEL SISTEMA DE MACIZOS.....	28
2.3 LOCALIZACIÓN Y MARCAJE DE LOS SISTEMAS DE MACIZOS.....	28
2.4 PRE-PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES.....	31
2.5 MUESTREO.....	31
2.6 PROCESAMIENTO EN ImageJ.....	32

2.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	37
3	<i>RESULTADOS</i>	40
3.1	DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE MACIZOS POR ORIENTACIÓN	41
3.2	DISTRIBUCIÓN, DISPERSIÓN Y ORIENTACIÓN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS POR MACIZO	41
3.3	COMPARACIÓN DE LOS PATRONES MORFOMÉTRICOS	46
3.4	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS POR CARA DEL ARRECIFE.....	47
3.5	ANÁLISIS KRUSKAL-WALLIS DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS POR CARA DEL ARRECIFE.	51
3.6	COMPARACIÓN MULTIPLE POST-HOC DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS POR CARA DEL ARRECIFE CON LA PRUEBA KRUSKAL-WALLIS.....	51
3.7	DISPERSIÓN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS POR CARAS FUSIONADAS.....	55
3.8	RELACIÓN DE LOS SECTORES CON CLIMA DE OLEAJE	58
4	<i>DISCUSIÓN</i>	60
5	<i>CONCLUSIONES</i>	63
	REFERENCIAS	65
	<i>ANEXO 1</i>	69
	<i>ANEXO 2</i>	71
	<i>ANEXO 3</i>	72
	<i>ANEXO 4</i>	73

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

- Figura 1. Mapa del Indo-Pacífico, el área oscura representa la piscina cálida del Indo-Pacífico. Tomado de Montaggioni, 2005.....10
- Figura 2. Curvas del nivel del mar del Indo-Pacífico y del Atlántico durante el Holoceno. Tomada y modificada de Gischler (2010).....12
- Figura 3. Regiones de clima de oleaje que influyen sobre el atolón Puka puka. PNE: Pacífico nor-ecuatorial. PSE: Pacífico sur-ecuatorial. PSSst: Pacífico sur subtropical. El cuadro amarillo representa la ubicación del Atolón Puka puka. El rectángulo rojo representa la extensión del Indo-pacífico. Tomada y modificada de Young (1999).....15
- Figura 4. Sistemas de macizos y surcos en el Indo-Pacífico y Atlántico. **a** Fotografía aérea del frente arrecifal del lado occidental del atolón Ari, en la parte central de las Maldivas (Océano Indico). **b** Fotografía bajo el agua de la misma ubicación que muestra formaciones planas de macizos, compuestos de algas coralinas y algunos *Acropora* sp. ramificados, y surcos en forma de V de 1 a 2 m de profundidad. **c** Fotografía aérea de la parte nor-oriental del arrecife Moorea (Océano Pacífico). **d** Fotografía bajo el agua de la misma área que muestra un bajo relieve de macizos, compuestos de algas coralinas y *Acropora* sp. ramificados, y surcos en forma de V de hasta 2 m de profundidad. **e** Fotografía aérea del frente arrecifal superficial en la barrera arrecifal central de Belice (Océano Atlántico). **f** Fotografía bajo el agua en la misma ubicación que muestra formaciones de macizos de hasta 5 m de altura, compuestos por *Acropora palmata* y *Millepora* sp., y surcos con abundante arena. Tomada y modificada de Gischler (2010).....17
- Figura 5. Esquema simplificado de una sección transversal, a través de un sistema de macizos y surcos, en a) el Indo-Pacífico y b) el Atlántico. Tomada y modificada de Gischler, 2010.....18
- Figura 6. Representación esquemática del sistema de macizos y surcos. Tomada y modificada de Munk y Sargent (1954).....19
- Figura 7. Localización y muestreo de un canal en aguas someras con alrededor de 70 m de longitud. A) Imagen de GE del Canal muestreado, localizado a 20°49'49''N, 86°52'46''O, con temporalidad en la imagen de 7/22/2009. B) los puntos por duplicado indican el primer y último registro del GPS en superficie para cada uno de los transectos medidos; nótese un desplazamiento de los puntos duplicados, el trazo se ilustra a través de los puntos GPS y éste no inicia necesariamente sobre estos. C) En total 30 mediciones de ancho de canal; los distintos colores representan distintos días de medición de longitudes, tomando en cuenta el límite de transición entre el arenal y la estructura arrecifal. D) Fotografías del muestreo, 1-2) se midió desde el límite entre la estructura arrecifal y el arenal. 3-4) Registro de longitud bajo el agua y de posición en superficie con GPS. 5-6) Colocación del sistema para efectuar la medición. Imágenes A, B y C, copyright de GE, DigitalGlobe, 2014....27
- Figura 8. Búsqueda en el registro temporal disponible de GE; como ejemplo, registro de sistemas de macizos y surcos en el atolón Puka puka, perteneciente a las Islas Cook de Nueva Zelanda, con ubicación en la zona sur-oriental a 10° S, 165° O. A y B son imágenes del mismo lugar con distinto registro temporal. Imágenes Copyright de GE, DigitalGlobe, 2014.....28
- Figura 9. Localización de estructuras de macizos y surcos. A) Océano Pacífico occidental. B) Océano Índico. El color rojo indica la ausencia de sistemas de macizos (28 islas). El color verde indica la presencia de sistema de macizos (126 atolones e islas). El color amarillo indica la presencia de sistemas macizos, pero la ausencia de imágenes claras para poder determinar un análisis cuantitativo (10 atolones). Imagen Copyright de GE, Landsat, 2015.....29
- Figura 10. Localización de estructuras de macizos y surcos en tres atolones. En color rosa, Atolón Puka puka con

15 km de estructuras (60.5% de su perímetro arrecifal). En color verde, el atolón Ailinglaplap con 52.1 km de estructuras (50.23% de su perímetro arrecifal). En color violeta, el atolón Agalega con 33.9 km de estructuras (98% de su perímetro arrecifal). En blanco, los atolones Fulangi y Diego Garcia con 82.3 km (48.7% de perímetro arrecifal) y 21.2 km (44.2% de perímetro arrecifal) de estructuras de macizos y surcos respectivamente. Imagen Copyright de GE, Landsat, 2015.....	30
Figura 11. Captura de imágenes en formato JPG. La dirección de la imagen siempre apuntando hacia el norte, con una inclinación de 90 °, y manteniendo la herramienta de longitud de GE con una dimensión de 30 m. Se observa la colocación de marcas discretas que indican la longitud de un transecto de aproximadamente 100 m.....	32
Figura 12. Calibración, donde se define el valor de pixel/metro en la imagen a procesar.....	33
Figura 13. Por diferencia en uniformidad de color se separa la línea de rompiente de los sistemas de macizos y surcos.....	33
Figura 14. Track de 5 m sobre la línea de rompiente, el cual cubre la espuma residual de la rompiente. Sobre éste se proyectara el segmento que aislara al sistema de macizos y surcos.....	34
Figura 15. Segmento de 20 m de ancho. Creando una delimitación del sistema para eliminar el ruido de fondo. El ancho es una magnitud adecuada para extraer el valor de orientación.....	34
Figura 16. Aislado y eliminación del exterior del segmento.....	35
Figura 17. Contraste automático supervisado.....	35
Figura 18. Binarización y validación de las estructuras del sistema de macizos.....	35
Figura 19. Corrección por separación del sistema de macizos cercanos a la zona de rompiente.....	36
Figura 20. Primera corrección de la orientación sobre la hoja de cálculo de la base de datos. Mediante la operación $[(180-\text{ángulo Image } j) \times -1] + 360$ se obtiene el ángulo de 180 a 360°.....	36
Figura 21. Segunda corrección de la orientación sobre la hoja de cálculo de la base de datos. De acuerdo con el cuadrante del que se trate, se aplica la operación y se obtiene la orientación geográfica de los macizos.....	37
Figura 22. Modelo de Kruskal-Wallis. Tomada y modificada de Pagano, 2011.....	38
Figura 23. Punto inicial y dirección del muestreo de los 247 segmentos de 20x100 m del perímetro arrecifal del Atolón Puka puka.....	40
Figura 24. A la izquierda, los 1517 macizos por orientación cardinal del arrecife frontal del Atolón Puka puka. A la derecha, la orientación radial de los macizos.....	41
Figura 25. En orden descendente, orientación radial y distribución de frecuencia de los 1517 macizos de acuerdo con la orientación en 16 rumbos geográficos en el Atolón Puka puka.....	42
Figura 26. Boxplot del área del sistema de macizos por orientación geográfica.....	43
Figura 27. Orientación radial de la mediana del área del sistema de macizos en el atolón Puka puka.....	44
Figura 28. Boxplot del ancho (m) del sistema de macizos por orientación geográfica.....	45
Figura 29. Orientación radial de la mediana del ancho del sistema de macizos en el atolón Puka puka.....	46
Figura 30. Orientación radial de la frecuencia, mediana del área, mediana del ancho del sistema de macizos en el Atolón Puka puka. Los datos de mediana del ancho (x10) y frecuencia (F/2) fueron libremente	

transformados con la finalidad de poder comparar las escalas.....	47
Figura 31. Cinco caras del arrecife frontal del atolón Puka puka.....	47
Figura 32. Boxplot del área (m ²) del sistema de macizos por cara del arrecife.....	48
Figura 33. Dotchart del área (m ²) del sistema de macizos por cara del arrecife.....	48
Figura 34. Boxplot del ancho (m) del sistema de macizos por cara del arrecife.....	49
Figura 35. Dotchart del ancho (m) del sistema de macizos por cara del arrecife.....	49
Figura 36. Boxplot de la orientación (grados) del sistema de macizos por cara del arrecife.....	50
Figura 37. Dotchart de la orientación (grados) del sistema de macizos por cara del arrecife.....	50
Figura 38. Dispersión del área del sistema de macizos con base en la orientación por cara del arrecife.....	52
Figura 39. Dispersión del ancho del sistema de macizos con base en la orientación por cara del arrecife.....	53
Figura 40. Dispersión de la orientación del sistema de macizos por cara del arrecife.....	54
Figura 41. Boxplot del área (m ²) del sistema de macizos por sector del arrecife.....	54
Figura 42. Boxplot del ancho (m) del sistema de macizos por sector del arrecife.....	55
Figura 43. Boxplot de la orientación (grados) del sistema de macizos por sector del arrecife.....	56
Figura 44. Dispersión del área del sistema de macizos con base en la orientación por sector del arrecife.....	56
Figura 45. Dispersión del ancho del sistema de macizos con base en la orientación por sector del arrecife.....	57
Figura 46. Dispersión de la orientación del sistema de macizos por sector del arrecife.....	58
Figura 47. Relación de los sectores del sistema de macizos con el clima de oleaje sobre el atolón Puka puka....	59
Figura 48. Orientación geográfica de los 163 segmentos con sistema de macizos en el Atolón Puka puka.....	72

Tablas

Tabla 1. Regiones climáticas cercanas al atolón Puka puka, propuestas por Young (1999). PNE : Pacífico Nor-ecuatorial. PSE : Pacífico Sur-ecuatorial. PSSt : Pacífico Sur subtropical. H_s : Altura del oleaje significativo en metros, T_m : Periodo promedio (cresta a cresta) en segundos, Θ_w : Dirección del oleaje en grados, U₁₀ : Velocidad del viento en el intervalo de 10 m sobre la superficie del mar, Θ_u : Dirección del viento (en grados).....	14
Tabla 2. Principales proveedores de las imágenes más comunes en Google Earth®. Modificada de Fisher <i>et al.</i> , 2012.....	22
Tabla 3. Extensión de sistemas de macizos y surcos en más del 50% del perímetro arrecifal en dos atolones y una isla del Indo-pacífico. Se muestran también dos atolones con casi el 50% de sistemas en imágenes claras.....	30
Tabla 4. Parámetros morfométricos de 1517 macizos a partir de 247 segmentos del perímetro total del arrecife.....	41
Tabla 5. Resultados de la prueba Kruskal-Wallis del área, ancho y orientación de macizos por cara del arrecife del atolón Puka puka. Con un nivel de confianza del 95% (α=0.05), se comprueba que existen diferencias significativas en los parámetros morfométricos de los macizos en función de la cara del	

arrecife.....	51
Tabla 6. Resultados de la comparación múltiple a posteriori de Kruskal-Wallis para el área de macizos por cara del arrecife del atolón Puka puka. Con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$), se establece que las medianas de las dos parejas de factores representadas por las caras A-E y C-D no difieren significativamente en relación con el área de macizos en función de la cara del arrecife.....	52
Tabla 7. Resultados de la comparación múltiple a posteriori de Kruskal-Wallis para el ancho de macizos por cara del arrecife del atolón Puka puka. Con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$), se establece que las medianas de las tres parejas de factores representadas por las caras A-C, A-E y C-D no difieren significativamente en relación con el ancho de macizos en función de la cara del arrecife.....	53
Tabla 8. Resultados de la comparación múltiple a posteriori de Kruskal-Wallis para la orientación de macizos por cara del arrecife del atolón Puka puka. Con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$), se establece que las medianas de la pareja de factores representada por las caras A-E no difieren significativamente en relación con la orientación de macizos en función de la cara del arrecife.....	54
Tabla 9. Matriz de parámetros morfométricos promedio a partir del procesamiento de 247 segmentos de 20x100 m en el perímetro arrecifal del atolón Puka puka. 163 de éstos contaron con al menos un macizo por segmento. S: segmento, F: frecuencia. El remarcado suave indica los segmentos donde no hubo macizos.....	69
Tabla 10. Los 16 rumbos colaterales de orientación geográfica con una amplitud de 22.5 grados cada uno.....	71
Tabla 11. Valores de los parámetros morfométricos por macizo de cada orientación geográfica.....	73

RESUMEN

Se propone un método de muestreo y procesamiento digital de imágenes a partir de software libre para utilizarse como una herramienta de análisis en el estudio de la morfometría de estructuras del sistema de macizos del arrecife frontal del Atolón Puka puka, ubicado en la zona sur oriental del Indo-pacífico. Mediante la detección de las estructuras de macizos en imágenes de alta resolución extraídas de Google Earth® (GE) y el procesamiento digital de imágenes llevado a cabo con el software ImageJ bajo el procedimiento de *acotación-validación-corrección* de las estructuras de macizos. Con el objetivo de cuantificar la distribución y morfometría del sistema de macizos utilizando la plataforma de análisis estadístico R; así como determinar la posible existencia de patrones y una probable relación entre la orientación de los parámetros morfométricos de frecuencia, área, y ancho de macizos con la exposición al clima de oleaje incidente.

Se analizaron un total de 247 segmentos de 20 x 100 m a lo largo de 25 km de periferia del arrecife frontal; 163 segmentos tuvieron presencia de sistema de macizos, lo que equivale a cerca de 15 km. Se contabilizaron 1517 macizos; a partir de los cuales se extrajeron los valores morfométricos de frecuencia, área, ancho y orientación. Se encontró la presencia de patrones bajo los cuales los sistemas de macizos parecen responder a la exposición al oleaje. El primer patrón sugiere que cuando la frecuencia de macizos aumenta, el área de macizos disminuye, y viceversa. El segundo patrón sugiere que cuando la frecuencia de macizos aumenta, el ancho de macizos disminuye, y viceversa.

La distribución y los patrones encontrados en el sistema de macizos sugieren una exposición diferencial del oleaje de acuerdo con la orientación geográfica en las distintas caras del arrecife frontal en el atolón Puka puka. La exposición posiblemente se relaciona con diferentes forzadores generadores del oleaje incidente en forma de swell, oleaje de viento o ambos.

Una prueba Kruskal-Wallis y la posterior comparación múltiple sobre los parámetros morfométricos por cara del arrecife permitieron determinar, tanto la relación entre las cinco caras arrecifales y las condiciones morfométricas diferentes en cada una de ellas, como el reconocimiento de la influencia del clima de oleaje sobre los sectores del arrecife. Pudiendo establecerse tres sectores como regiones de dominio del oleaje proveniente de distintas fuentes y direcciones.

Haciendo posible la propuesta de distintos escenarios causales de la respuesta del sistema de macizos por cada sector identificado del arrecife frontal en Puka puka.

Sobre el sector N la respuesta del sistema de macizos sucede por el swell del Pacífico Norte. En el sector S, al parecer el swell del Pacífico Sur es el generador de una máxima magnitud en el área y ancho contra una mínima frecuencia de macizos. Aunque, sobre ambos sectores el clima de oleaje proviene de procesos generados en distintos lugares, quizá la similitud en magnitud del oleaje incidente en forma de swell sea lo que provoque con respecto al ancho que parte del sector N no sea significativamente diferente a una parte del sector S.

Sobre el sector B, se sugiere que tanto el swell como el oleaje de viento del Este producen una retroalimentación positiva que genera una máxima frecuencia contra una mínima magnitud en el área y ancho de macizos. Lo que denota, que ambas fuentes de oleaje producen condiciones de mayor fuerza y energía que ocasionan una respuesta de mayor frecuencia de macizos contra una menor magnitud en el área y ancho.

INTRODUCCIÓN

Alrededor de todo el mundo las áreas poco profundas del arrecife frontal coralino usualmente están caracterizadas por estructuras que presentan un patrón de peine dentado con elongados canales, separados por crestas coralinas, y orientación perpendicular a la entrada del oleaje (Gischler, 2010; Shinn, 2011). Estas formaciones son los sistemas Spur and Groove, que denotan una alternancia entre Macizos y Surcos respectivamente; los cuales, surgen como proyecciones de los arrecifes de coral. Los sistemas de macizos forman una “zona de contrafuerte” porque actúan como un rompeolas natural (Munk y Sargent, 1954; Gischler, 2010; Shinn, 2011; Blanchon, 2011) que además de reducir su altura (entre un 20 y 47% de acuerdo con Roberts *et al.*, 1975; Gerritsen, 1981, en Lugo-Fernández *et al.*, 1998) y fuerza, armonizan la dirección y energía del oleaje (Shinn, 2011), incrementando la disipación de ésta última entre un 50 a 90% (Munk y Sargent, 1954; Kono y Tsukayama, 1980; Roberts, 1980, Roberts y Suhayda, 1983; en Lugo-Fernández *et al.*, 1998).

La región del Indo-Pacífico se caracteriza por ser energéticamente más activa con respecto a la intensidad de los vientos alisios, tormentas ciclónicas y al efecto estacional del Monzón; influyendo directamente sobre el clima de oleaje, el cual es un importante factor para muchos procesos geológicos y ecológicos (Hemer *et al.*, 2011). Es decir, por sus características mayormente marítimas los fenómenos climáticos de diferentes escalas espaciales y temporales son más intensos porque en esta zona se presentan las principales fuentes de calor convectivas que impulsan la circulación general del sistema tierra-atmosfera de gran alcance (Salahuddin y Curtis, 2009).

La morfometría como herramienta cuantitativa para el análisis geomorfológico se focaliza en las posibles relaciones entre la forma y el/los procesos que la generan; es decir, la mayoría de los fenómenos geomorfológicos pueden ser reconocidos como de carácter multifactorial (Chorley, 1962). Por lo que la morfometría arrecifal a través del análisis de imágenes satelitales representa una revolucionaria técnica no invasiva y con amplio espectro de utilización.

La hipótesis de este trabajo consiste en que la morfología de los sistemas de macizos es una característica emergente que surge como resultado de la interacción del crecimiento coralgal con el oleaje; es decir, su morfometría es un reflejo de la energía, flujo y dirección del oleaje, por lo que debe presentar cambios sistemáticos de acuerdo con la variación vectorial del oleaje incidente en distintas orientaciones del arrecife frontal.

Este trabajo tiene la finalidad de documentar cómo los parámetros morfométricos de los sistemas de macizos responden ante una exposición al oleaje proveniente de distintas direcciones, y determinar si existe una relación entre éstos parámetros basados en la orientación del sistema de macizos con la exposición al oleaje; para avanzar en el entendimiento de los controles ambientales de su desarrollo. Ya que si la formación de los sistemas de macizos sucede en respuesta unidireccional a la energía del oleaje (Shinn, 2011), entonces, la frecuencia en la que se presentan los macizos puede correlacionarse con la profundidad del agua y por ende con la energía de oleaje (Blanchon, 2011).

1 ANTECEDENTES

1.1 INDO-PACÍFICO

El Indo-Pacífico es la región de dominio oceánico donde convergen la zona suroccidental del Océano Pacífico y la zona oriental del Océano Índico, que se extiende aproximadamente desde los 26° N a 26° S, y 50° E a 180° W (Montaggioni, 2005; Salahuddin y Curtis, 2009).

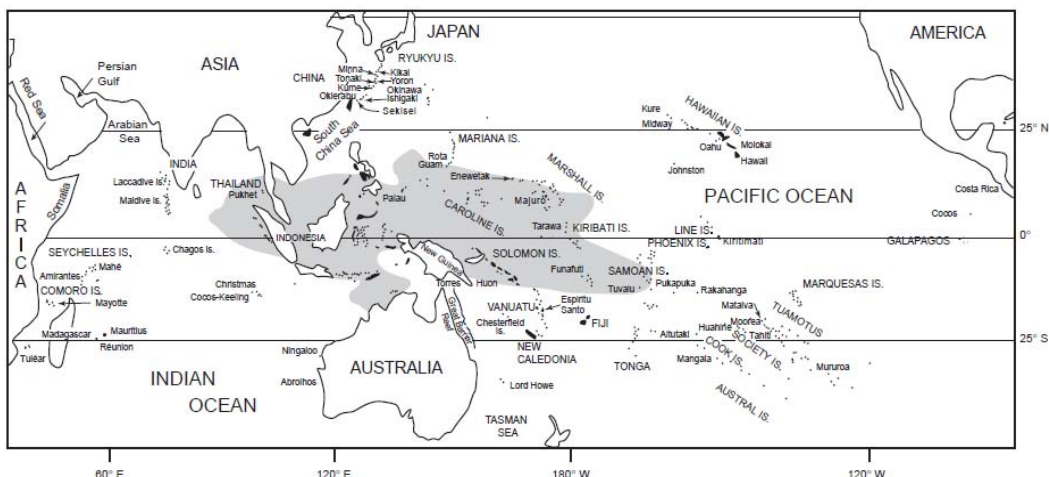


Figura 1. Mapa del Indo-Pacífico, el área oscura representa la piscina cálida del Indo-Pacífico. Tomado de Montaggioni, 2005.

1.1.1 OLAJE EN EL INDO-PACÍFICO

El oleaje es uno de los principales fenómenos de transferencia de movimiento y flujos de humedad que desempeña un importante papel en muchos procesos físicos de la interface aire-oceano (Li y Garrett 1997; Grachev y Fairall 2001; Chen *et al.*, 2002; Hanley y Belcher 2008; Fan *et al.*, 2009; Hanley *et al.*, 2010; Hemer *et al.*, 2010; Cavaleri *et al.*, 2012; Fan *et al.*, 2013), por lo que la porción dominante del espectro del oleaje en términos de energía está asociado con las llamadas gravity waves u ondas de gravedad, que representan más de la mitad de la energía transportada por todo el oleaje del océano, superando la contribución de las mareas, tsunamis y los aumentos repentinos debido a las surgencias costeras (Kinsman, 1965; Fan *et al.*, 2013).

Las ondas de gravedad se dividen en dos tipos, el llamado wind wave u oleaje de viento y el swell. El oleaje de viento, es el oleaje recientemente creado y en equilibrio con el viento local (Chen *et al.*, 2002; Fan *et al.*, 2013), que comúnmente tiene una mayor influencia en las costas de mares cerrados donde suceden eventos de viento extremo (Hanley *et al.*, 2010). Se presenta con mayor frecuencia en las latitudes

medias disminuyendo al mínimo en el ecuador (Chen *et al.*, 2002; Hanley *et al.*, 2010). El Swell, es el oleaje generado en otros lugares que se propaga a lo largo de grandes distancias (Fan *et al.*, 2013), y que ocurre más del 80% del tiempo en la mayoría de los océanos (Chen *et al.*, 2002). El swell se encuentra generalmente en mar abierto (Hanley *et al.*, 2010), por lo que afecta mayormente a las costas que están expuestas a estas condiciones.

A pesar de sus diferentes dinámicas, el oleaje de viento y el swell frecuentemente se sobrelapan y se mezclan de forma compleja, lo que ocasiona que al caracterizar al oleaje, sea difícil separar los dos fenómenos en observaciones reales. No obstante, existen modelos globales para la estimación de estos dos factores, los cuales son validados en lo posible por mediciones realizadas *in situ* a bordo de buques (Gulev y Grigorieva 2006) y/o boyas. No obstante, los datos proporcionados son muy escasos (Trenham *et al.*, 2013), debido a que cada una de las fuentes presenta obstáculos, particularmente cuando se requieren datos climatológicos de escala global (Young, 1999), y porque su monitoreo comenzó hace aproximadamente 25 años a finales de la década de 1980 y principios de 1990, por lo que su aplicación en la variabilidad climática del oleaje es limitada (Hermer *et al.*, 2011). Dichos modelos están basados principalmente en mediciones con altímetros satelitales, dispersómetros (Chen *et al.*, 2002; Hemer *et al.*, 2010; Young *et al.*, 2011), y modelos numéricos (Young, 1999) que evalúan distintas condiciones del oleaje como la altura, periodo, y dirección, así como la velocidad y dirección del viento; haciendo posible la propuesta general de distintos ambientes con dominancia de uno u otro fenómeno.

De acuerdo con autores como Chen *et al.* (2002), y Fan *et al.* (2013), la parte oriental del Indo-Pacífico es la tercer zona generadora más grande de swell; el cual es más fuerte durante el invierno y otoño austral en el pacífico occidental y sur del océano Indico (Fan *et al.*, 2013), ocurriendo lo mismo para el hemisferio norte durante el invierno boreal (Chen *et al.*, 2002). Esto es, el swell originado por las tormentas invernales en latitudes medias (Young, 1999) de ambos hemisferios, llega a alcanzar el ecuador (Kinsman, 1965), incluso el swell del Pacífico sur llega hasta el Pacífico norte (Young, 1999).

Por otro lado, el oleaje de viento obedece estrechamente al patrón de vientos (Chen *et al.*, 2002) y se ve influenciado principalmente por la asimetría en la distribución de las masas continentales de los hemisferios, lo que propicia una mayor velocidad de los vientos en el hemisferio sur (Young, 1999), sobre todo en las latitudes medias (Fan *et al.*, 2013). La generación de oleaje de viento es comúnmente débil en las grandes zonas generadoras de swell, como el Pacífico tropical (Fan *et al.*, 2013); sin embargo, donde existe swell debilitado no siempre sucede la generación de un fuerte oleaje de viento (Chen *et al.*, 2002). El oleaje de viento varía estacional y regionalmente; por un lado, presenta un moderado crecimiento durante la primavera en ambos hemisferios, seguido de una dramática disminución global en verano con

un aumento máximo en otoño; y por otro, permanece fuerte durante el invierno del hemisferio norte, lo que propicia que ocasionalmente los vientos alisios puedan ser dominantes en la costa oriental del pacifico occidental (Fan *et al.*, 2013), mientras que se debilita gradualmente en el hemisferio sur. Además, contrario a las tendencias estacionales, el oleaje de viento llega a tener un aumento en el mar arábigo y china meridional durante el verano boreal debido al monzón asiático; así como en la parte occidental del Pacífico y el Atlántico debido en parte a la frecuencia de las tormentas tropicales (Vitart *et al.*, 1997).

1.1.2 CAMBIO DEL NIVEL DEL MAR EN EL INDO-PACÍFICO

Actualmente, en la mayoría de los arrecifes frontales del Indo-Pacífico la energía del oleaje es comparativamente más alta que en las mismas zonas arrecifales del Atlántico (Gischler, 2010). Y así parece haber sido desde inicios del Holoceno tardío (aproximadamente los últimos 3600 años cal. AP, Cortese *et al.*, 2005), debido principalmente a las diferencias en el cambio del nivel del mar en estas dos regiones, el cual controló tanto a la exposición al oleaje y corrientes, como las tasas de acreción arrecifal.

Se ha observado que la región del Indo-Pacífico durante el Holoceno tardío se caracteriza por curvas transgresivas–regresivas respecto al nivel del mar relativo, mientras que el Atlántico occidental, en el Caribe, se caracteriza por curvas completamente transgresivas (Gischler, 2010), como se observa en la figura 2. Para el caso del Indo-Pacífico la transgresión–regresión del nivel del mar relativo creó un descenso que mantuvo condiciones de alta energía en los frentes arrecifales, por lo que la elevada exposición al oleaje y corrientes pudieron favorecer la erosión y la actual dominancia de algas coralinas costosas. Mientras que para la región del Atlántico la transgresión creó una profundización que mantuvo un espacio en la columna de agua que pudo favorecer para la acreción de corales acroporidos.

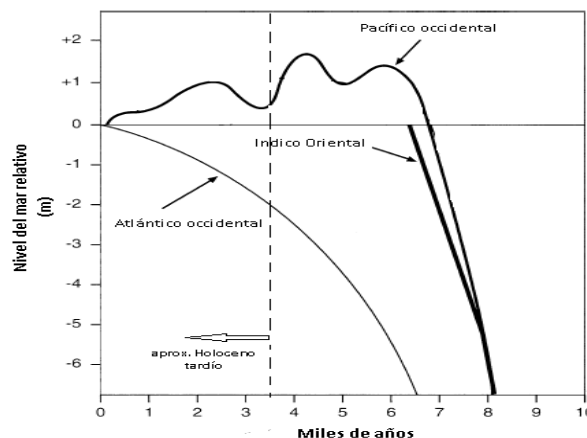


Figura 2. Curvas del nivel del mar del Indo-Pacífico y del Atlántico durante el Holoceno. Tomada y modificada de Gischler (2010).

La acreción de los arrecifes de coral durante el Holoceno ha dependido del nivel del mar; y la exposición al oleaje ligada a éste es tal vez el factor más importante que controla el desarrollo de los arrecifes de coral (Grigg, 1998); es decir, la energía hidrodinámica es considerada como el mayor control de la acreción arrecifal del Holoceno (Montaggioni, 2005).

1.1.3 CLIMA DE OLEAJE SOBRE EL ATOLÓN PUKA PUKA

El Atolón Puka puka, originalmente llamado Ulu-o-te-Watu o danger islands, fue descubierto en 1765, y desde inicios del siglo XX forma parte de las islas Cook de Nueva Zelanda. Con ubicación a los 10°52'48''S, 165°50'52''O, se sitúa a más de 1200 km al sur del ecuador, y a más de 700 km de distancia de cualquier otro atolón; posee 5 km² de tierra firme, cuya elevación no supera los 12 m.

Está formado por un grupo de tres islotes conectados por una barrera arrecifal que en su parte suroccidental siempre ésta bajo el agua, mientras que en su parte oriental presenta bancos de arena sobre los cuales se encuentran zonas de rompiente. Todo el arrecife forma una laguna triangular que alcanza una profundidad de 15 m, con 8 km de ancho en el norte y de 1.5 a 3 km de ancho en el sur. Existe un arrecife que se extiende 5 km al occidente a partir de la isla que está más al sur hasta un banco de arena. Registros del tiempo meteorológico que datan de 1930 a 1935 indican una precipitación promedio de 326.13 cm al año, con estación de lluvias de julio a febrero. Temperatura promedio de 27.9 C con mínima de 19.4 C y máxima de 33.4 C. Los vientos dominantes del este y sureste ocurren de mayo a octubre, mientras que desde el norte ocurren vientos creados por tormentas ocasionales de noviembre a abril.

El atolón al encontrarse en el Pacífico Sur-ecuatorial, está bajo la influencia de distintas regiones de clima de oleaje propuestas por Young (1999), que surgieron a partir del diseño de un modelo combinado de datos satelitales y predicción numérica para condiciones globales de viento y oleaje oceánico con datos de 10 años y resolución global de 2 (222 km). Cada región presenta estimaciones promedio anuales para las condiciones de altura significativa, periodo, y dirección del oleaje; así como, velocidad y dirección del viento (Tabla 1).

Tabla 1. Regiones climáticas cercanas al atolón Puka puka, propuestas por Young (1999). **PNE**: Pacífico Nor-ecuatorial. **PSE**: Pacífico Sur-ecuatorial. **PSSt**: Pacífico Sur subtropical. **H_s**: Altura del oleaje significativo en metros, **T_m**: Periodo promedio (cresta a cresta) en segundos, **Θ_w**: Dirección del oleaje en grados, **U₁₀**: Velocidad del viento en el intervalo de 10 m sobre la superficie del mar, **Θ_u**: Dirección del viento (en grados).

	H_s	T_m	Θ_w	U₁₀	Θ_u
PNE 0-20 173 -114	2 - 3	8 - 12	-	8	0 270 90 180 Todo el año
	Azul : Invierno del Hemisferio Norte				
PSE 0-20 173 -114 Pukapuka	2	9 - 12	-	5-7	0 270 90 180 Todo el año
	Azul : Invierno del Hemisferio Sur				
PSSt 20-33 170 -114	2.5-3.3	9 - 13	-	6-8	0 270 90 180
	Azul : Invierno del Hemisferio Sur				

Como se observa en la Tabla 1, tanto H_s, T_m, U₁₀ varían muy poco y presentan gran regularidad promedio en las tres regiones; a diferencia de Θ_w la cual varía en gran

medida tanto en una misma región como entre regiones.

En el caso de las regiones del PNE y PSE, la Θ_w y la Θ_u se sobrelapan, creando aparentemente una sinergia que influye directamente sobre el oleaje incidente; sin embargo; dentro de una misma región, la Θ_w puede desviarse considerablemente de la Θ_u local, como se observa en el PSSt, lo cual es consistente con el hecho de que en esta región el swell de latitudes superiores es el factor dominante sobre los campos de oleaje (Young, 1999) por encima del oleaje de viento; sobre todo en el invierno austral (Fan *et al.*, 2013).

El swell parece ser el principal componente del oleaje que incide sobre el atolón Puka puka; por su ubicación cercana al ecuador en donde el oleaje de viento en forma de viento local y vientos alisios es mínimo la mayor parte del tiempo (Young, 1999; Fan *et al.*, 2013).

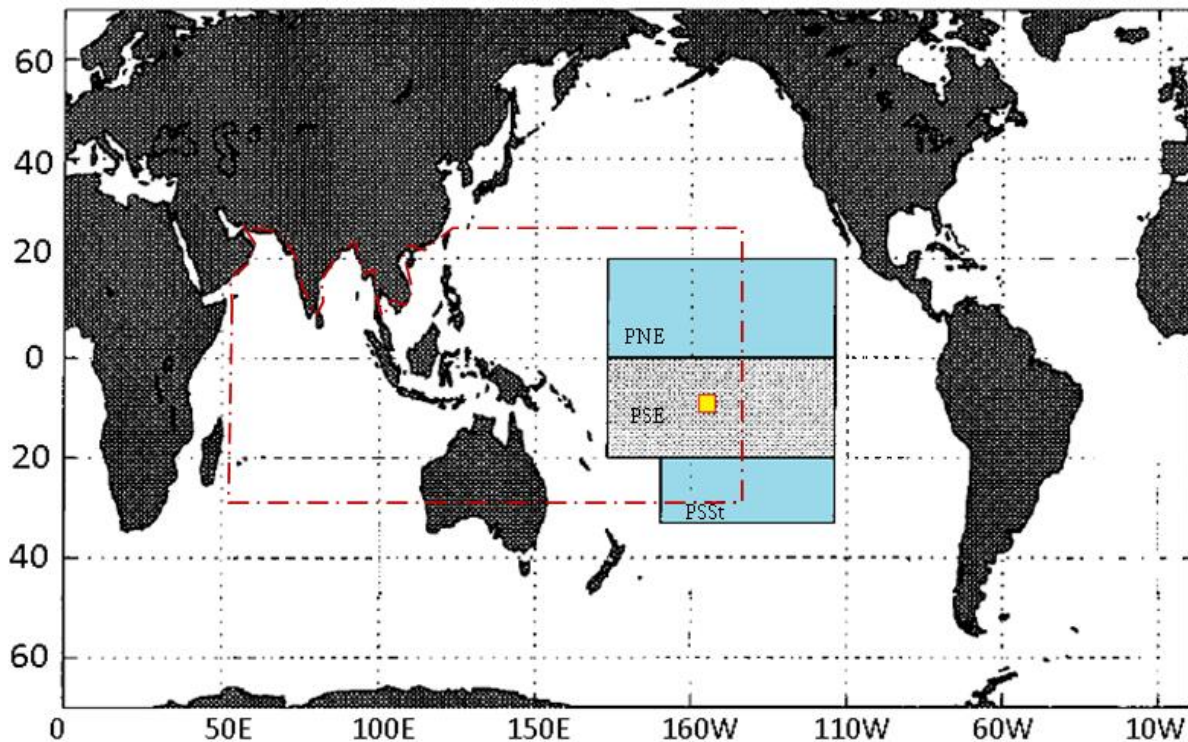


Figura 3. Regiones de clima de oleaje que influyen sobre el atolón Puka puka. PNE: Pacífico nor-ecuatorial. PSE: Pacífico sur-ecuatorial. PSSt: Pacífico sur subtropical. El cuadro amarillo representa la ubicación del Atolón Puka puka. El rectángulo rojo representa la extensión del Indo-pacífico. Tomada y modificada de Young (1999).

1.2 FORMACIÓN Y CRECIMIENTO DE LOS ARRECIFES DE CORAL

La formación y crecimiento de los arrecifes de coral representa un complejo fenómeno resultante de la interacción de factores biológicos, físicos, químicos, y geológicos (Rosen, 1982; Fagerstrom, 1987). Actualmente se infiere que su distribución es controlada principalmente por la temperatura superficial del mar,

disponibilidad de luz solar, y concentración de aragonita (Couse *et al.*, 2012). Sin embargo, tanto en el registro fósil como en el actual, la configuración de los sistemas de macizos y surcos no está bien entendida, ya que no es claro el mecanismo predominante de su formación (Nasser y Hatcher, 2000; Gischler, 2010; Shinn, 2011), y son muy pocos los estudios basados en perforaciones o excavaciones en afloramientos de arrecifes frontales que amplíen la comprensión del desarrollo de su estructura, ya que solo existen estudios basados en núcleos para el Caribe, sin reporte alguno para el Indo-pacífico (Blanchon, 2011), debido principalmente a las condiciones del oleaje tan inhóspito que dificulta o impide su realización en esta región (Gischler, 2010; Blanchon, 2011).

Hoy día se conoce que la estructura arrecifal es reflejo del control que tienen los procesos físicos sobre los arrecifes coralinos (Nasser y Hatcher, 2000). Factores como la dirección y fuerza del oleaje no solo determinan los patrones morfológicos del arrecife, sino también la productividad y la estructura de la comunidad (Munk y Sargent, 1954; Nasser y Hatcher, 2000).

1.2.1 SISTEMAS DE MACIZOS Y SURCOS DEL INDO-PACÍFICO

Adicionalmente, a las diferencias regionales en el cambio del nivel del mar relativo durante el Holoceno tardío para el Indo-pacífico y Atlántico, se conoce que los sistemas de macizos y surcos del Indo-Pacífico se caracterizan por desarrollar macizos anchos y planos, cubiertos por algas coralinas costrosas de lento crecimiento (>3 mm/año, Montaggioni, 2005), las cuales cumplen la función de estabilizar o consolidar la unión de detritos calcáreos (Blanchon, 2011), formándose una estructura que además se fortalece por la precipitación autigénica de aragonita ($100 \mu\text{m/año}$, Gischler, 2010) y de calcita rica en magnesio, la cual se ve favorecida por la circulación de agua marina que se potencializa por el oleaje e incrementa el volumen de agua rica en carbonatos que fluye a través del arrecife frontal y ayuda a reforzar su estructura (Gischler, 2010; Shinn, 2011). Sobre los sistemas de macizos de ésta región crecen muy pocos corales dentro de los que se encuentran sobre todo acroporidos (Gischler, 2010). Los surcos son relativamente estrechos en forma de V y están cubiertos escasamente con arena y escombros (Gischler, 2010) (fig. 2 a-d), sin embargo, en la mayoría de los casos durante condiciones de mar muy agitado dentro de los surcos se crean socavones por la actividad de molienda de rocas redondeadas de mayor tamaño que actúan como mortero y aumentan el tamaño de las oquedades, mientras que éstas van disminuyendo su diámetro por la acción de molienda (Shinn, 2011).

En contraste, la región del Atlántico occidental en el Caribe, presenta sistemas de macizos y surcos que poseen macizos con una elevada cubierta coralina debida al crecimiento de acroporidos ramificados (>30 mm/año, Montaggioni, 2005), los cuales

durante tormentas pueden quedar convertidos en cascajo (Blanchon, 2011). Los surcos tienen forma de U y están cubiertos abundantemente con arena (Gischler, 2010), (Figura. 4 e, f), como se observa en la figura 5.



Figura 4. Sistemas de macizos y surcos en el Indo-Pacífico y Atlántico. **a** Fotografía aérea del frente arrecifal del lado occidental del atolón Ari, en la parte central de las Maldivas (Océano Indico). **b** Fotografía bajo el agua de la misma ubicación que muestra formaciones planas de macizos, compuestos de algas coralinas y algunos *Acropora* sp. ramificados, y surcos en forma de V de 1 a 2 m de profundidad. **c** Fotografía aérea de la parte nor-oriental del arrecife Moorea (Océano Pacífico). **d** Fotografía bajo el agua de la misma área que muestra un bajo relieve de macizos, compuestos de algas coralinas y *Acropora* sp. ramificados, y surcos en forma de V de hasta 2 m de profundidad. **e** Fotografía aérea del frente arrecifal superficial en la barrera arrecifal central de Belice (Océano Atlántico). **f** Fotografía bajo el agua en la misma ubicación que muestra formaciones de macizos de hasta 5 m de altura, compuestos por *Acropora palmata* y *Millepora* sp., y surcos con abundante arena. Tomada y modificada de Gischler (2010).

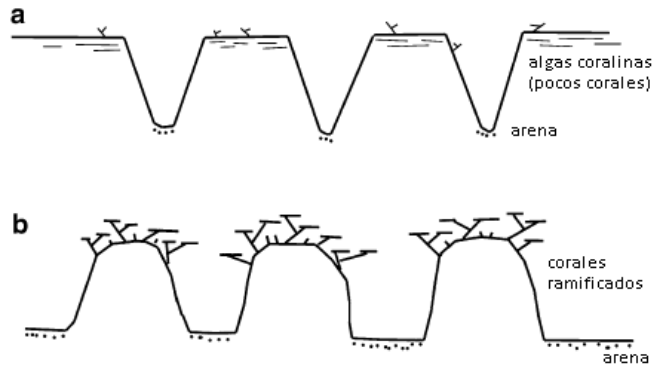


Figura 5. Esquema simplificado de una sección transversal, a través de un sistema de macizos y surcos, en a) el Indo-Pacífico y b) el Atlántico. Tomada y modificada de Gischler, 2010.

Ambos tipos de sistema de macizos y surcos, tanto los dominados por algas costrosas, como los dominados por corales, no son mutuamente excluyentes ya que su distribución y forma es controlada por la energía del oleaje (Blanchon, 2011); sin embargo, de manera general tienden a presentarse mayormente en una u otra región. Además, de acuerdo con Blanchon (2011), se ha observado que los sistemas de macizos dominados por algas costrosas se desarrollan y extienden mar adentro, es decir, acrecionan de manera progradante, a diferencia de los sistemas de macizos dominados por corales, los cuales acrecionan sobre el propio arrecife posterior, por lo que retrogradan cuando el nivel del mar aumenta.

1.2.2 DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE MACIZOS Y SURCOS

Los sistemas de macizos y surcos se desarrollan en la zona de barlovento y sus características son claramente visibles desde imágenes aéreas (Shinn, 2011). Los surcos se presentan del lado de la cara arrecifal que da hacia el mar, con 1 a 3 m de ancho y 2 a 8 m de profundidad (Blanchon, 2011), mientras que los canales de oleaje se presentan del lado de la planicie arrecifal con pocos metros de ancho y de profundidad (Munk y Sargent, 1954) (fig. 6). Los macizos pueden desarrollar relieves de 6 a 8 m (Gischler, 2010; Shinn, 2011), y tienen de 4 a 8 m de ancho comúnmente, pero en sus extremos finales hacia el mar llegan a tener amplitudes de 5 a 8 m y terminar en profundidades que van desde 5 hasta 10 m (Blanchon, 2011). En la zona de rompiente los sistemas de macizos tienen una separación de un macizo cada 6 a 10 m, mientras que en los sistemas de aguas más profundas los macizos tienen una separación de 30 m o más, en gran parte como resultado de un mayor ancho en los macizos y mayores longitudes de onda del oleaje (Blanchon, 2011).

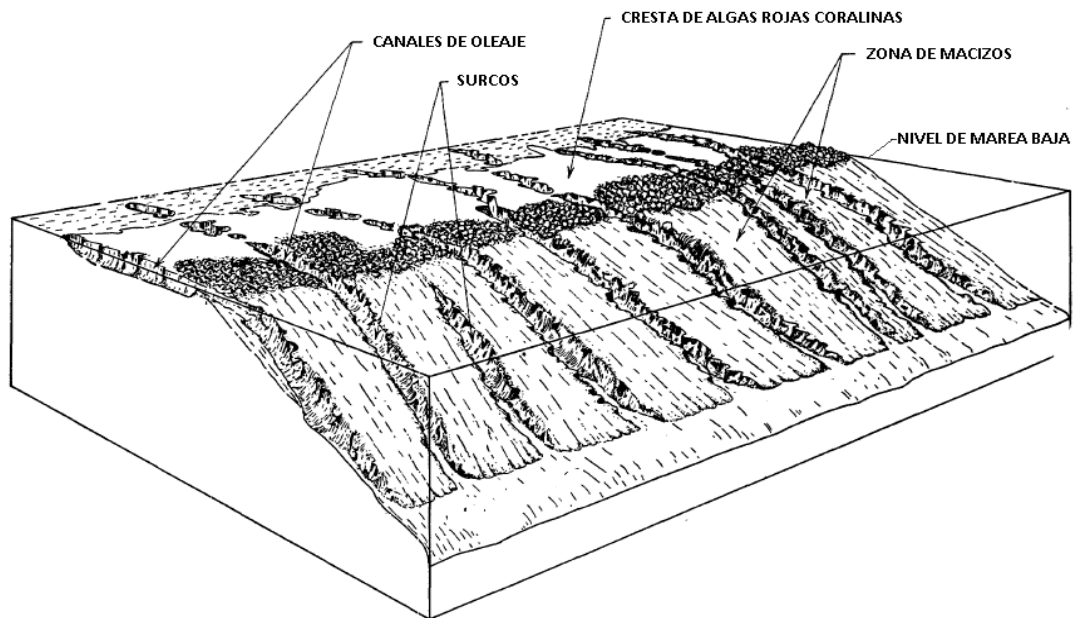


Figura 6. Representación esquemática del sistema de macizos y surcos. Tomada y modificada de Munk y Sargent (1954).

1.3 PERCEPCIÓN REMOTA Y GOOGLE EARTH

La percepción remota (PR) es una tecnología desarrollada para muestrear y/o medir diferentes formas de energía reflejada o emitida, especialmente de radiación electromagnética; como una manera de recolectar e interpretar información espacial, a partir de plataformas terrestres, aéreas o espaciales. Las plataformas espaciales a bordo de satélites, circunnavegan la Tierra en diferentes orbitas, cuyas características son definidas por la inclinación¹, Nadir² y periodo de revolución³ (Elachi, 2006). Siendo fundamentales en PR la órbita polar y la geoestacionaria para las plataformas espaciales (Pinilla, 1995); la primera indica que mientras el satélite gira sobre su propio eje en pases ascendentes y descendentes, la Tierra lo hace sobre el suyo, de tal forma que cada ocasión que el satélite completa la vuelta, se escanea a través del Swath⁴ una franja diferente de la superficie, de modo que después de varios ciclos se obtiene el registro de toda la Tierra (Elachi, 2006). En la órbita geoestacionaria los satélites meteorológicos giran a velocidades similares a la rotación terrestre, por lo que su periodo orbital es de 24 horas.

Los modelos de PR se basan, tanto en el origen de la fuente de energía, como en las regiones de longitud de onda en las que colectan la información (Chuvienco, 2000). Por lo que por un lado, de acuerdo al origen de la energía se definen los sensores

¹ Inclinación: Ángulo definido por la intersección del plano orbital y del plano ecuatorial terrestre.

² Nadir: Vertical al satélite.

³ Periodo de revolución: Tiempo que tarda en dar una vuelta completa.

⁴ Swath: Área registrada en la imagen o ancho de barrido, el cual varía entre decenas o centenas de kilómetros.

pasivos y activos; y por el otro, de acuerdo a la longitud de onda, en reflectiva en el visible e infrarrojo, en el térmico infrarrojo y en microondas.

Los sensores pasivos detectan la radiación electromagnética reflejada o emitida a partir de fuentes naturales, por lo que dependen de las condiciones de iluminación de la escena. Los sensores activos, detectan la respuesta reflejada de objetos iluminados a partir de fuentes artificiales de energía (Jensen, 1996).

Otra característica fundamental de los sensores que es esencial para el entendimiento de detalles prácticos y conceptuales de la PR es la resolución de imagen, la cual puede definirse como la habilidad de un sistema para registrar detalles de una manera distinguible. Ya que las imágenes digitales no tienen escala, solo se puede hablar de resolución (Pinilla-Ruiz, 1995).

Es así que la PR se ha convertido en una disciplina que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre sin tener contacto físico con ellos. La información obtenida se integra a los sistemas de información geográfica (SIG) para su procesamiento (Maune, 2007). Se ha considerado que la PR proporciona una forma eficaz para observar los arrecifes de coral poco profundos en todo el mundo (Andr fo u t *et al.*, 2003).

La plataforma Google Earth® (GE) es un motor de producción cartográfica (Metternicht, 2006) que modela la Tierra como un globo virtual, el cual ofrece mapas compuestos por la superposición de imágenes satelitales, fotografía aérea, e información geográfica proveniente del modelado de distintos SIG (Potere, 2008).

A una década de ser reconocido por su potencial para mejorar significativamente la visualización y difusión de datos (Butler, 2006; Guralnick *et al.*, 2007), el análisis científico del terreno y la descripción de la superficie terrestre mediante las imágenes de alta resolución que ofrece éste software siguen siendo un recurso sin explotar; en donde el costo de imágenes comerciales de alta resolución es aun prohibitivo para muchas aplicaciones de la ciencia (Potere, 2008).

GE provee imágenes gratuitas con una resolución espacial que va de los 0.5 a 8 m en el caso de cuatro de sus mayores proveedores de imágenes, y de 30 a 15 m tratándose del proveedor Terra Metrics; en otras palabras, GE no informa sobre la resolución precisa de las imágenes que utiliza, solo proporciona información sobre el proveedor; por lo que, al conocer este último se puede deducir de forma indirecta y aproximada la resolución que tiene la imagen (Tabla 2). Gran parte de las imágenes de alta resolución de GE provienen del satélite QuickBird del proveedor Digital Globe®; un satélite de órbita polar con un sensor que puede producir una resolución inferior a 1 m, y una precisión horizontal de 23 m (DigitalGlobe-2008).

Sin embargo, GE presenta una serie de inconvenientes ya que ofrece estas imágenes de alta resolución en un concepto llamado color verdadero, las imágenes no incluyen la banda infrarroja y a veces su resolución espacial es un poco más gruesa que las imágenes nativas proporcionadas directamente por los operadores de los sensores. Las imágenes no cuentan con un registro temporal detallado sobre la adquisición de las imágenes, transformaciones o propiedades espectrales y espaciales; no informa sobre interpolaciones espaciales; es decir, no se conocen los niveles de procesamiento, por lo que, la resolución espacial y temporal es una variable que no depende del control de la toma de datos que se desee extraer, si no del tipo de imagen con la cual GE diseña sus mosaicos de imágenes satelitales.

La calidad y resolución de los mapas de imágenes varía mucho, además de que la cobertura de nubes y sombras a veces oscurecen las características del terreno; y generalmente se presenta una mejor calidad para Europa y Norteamérica; sin embargo, la resolución sigue siendo adecuada para identificar detalles de áreas urbanas (Chang *et al.*, 2009) y áreas no perturbadas.

Una última limitación de GE es la referente con la información sobre la precisión de geo-registro, el cual se relaciona a un error intrínseco en la alineación de posición de las imágenes. De acuerdo con Potere (2008), éste error puede ser acotado y aproximado, ya que el mismo autor ha estimado la exactitud de la posición horizontal de las imágenes de GE, en aproximadamente 30 m de error promedio a nivel global, y de 19 m para el área de Nueva Zelanda.

No obstante a la lista de limitaciones con la que GE hace públicos los datos particulares de cada imagen, un usuario de este software frecuentemente puede discernir entre el tipo de cobertura del terreno, perturbación u otros atributos basándose solo en la imagen (Potere, 2008).

La plataforma GE no solamente representa una importante herramienta de apoyo logístico al ahorrar tiempo y recursos en el estudio de áreas geográficas extensas y de difícil acceso; si no que además, provee una ventana de imágenes espaciales de alta resolución (Kennedy y Bishop, 2011) en una escala espacial y temporal única; muy útil como fuente primaria de extracción de datos y reconocimiento de estructuras, para abordar problemas cuantitativos no resueltos mediante técnicas tradicionales (Fisher *et al.*, 2012).

Tabla 2. Principales proveedores de las imágenes más comunes en Google Earth®. Modificada de Fisher *et al.*, 2012.

Tipo de imagen	Resolución espacial (m)	Principal proveedor de imágenes
Landsat 7 ETM+	30 o 15	Terra Metrics, Inc. NASA
SPOT, FORMOSAT-2, KOMPSAT-2, Pleiades	0.5 - 8	Spot Image S.A. (CNES-Atrium)
Worldview-1, Worldview-2, Quickbird	0.5 – 2.5	Digital Globe, Inc.
GeoEye-1, IKONOS,	0.5 – 3.2	GeoEye, Inc.
Aerial Imagery (USA)	0.5 – 2	U.S. Department of Agriculture; U.S. Geological Survey; Bluesky; Aerodata International Surveys; etc.

1.4 ESTUDIOS PREVIOS DE LOS SISTEMAS DE MACIZOS Y SURCOS EN EL INDO-PACÍFICO

Una extensa revisión en la literatura demostró que ningún estudio previo ha sido considerado para investigar la morfometría de los sistemas de macizos por medio de GE o alguna otra fuente de información libre.

Los estudios previos basados en exploración de campo y/o PR sobre los sistemas de macizos y surcos que a continuación se describen datan desde comienzos de la década de 1950 del siglo pasado hasta la actualidad. En este lapso de tiempo se ha sugerido la existencia de distintos patrones y posibles relaciones de la morfología de los sistemas de macizos y surcos con la energía del oleaje.

Munk y Sargent (1954), estudiaron mediante trabajo de campo y análisis de fotografía aérea la distribución de los surcos y la dirección del oleaje en el Atolón Bikini. Sugirieron que la forma de los arrecifes representa algún tipo de equilibrio entre la erosión o poder destructivo de las olas y el crecimiento potencial de los organismos constructores del arrecife. En áreas donde la acción del oleaje es mayor, el crecimiento de los corales constructores de arrecife es mucho más rápido. La profundidad absoluta con la cual los surcos comienzan desde el frente arrecifal parece ser constante y se extiende a la mayor profundidad en la que la acción de

oleaje es apreciable. Sugirieron que la distribución de los surcos podría correlacionarse con la distribución de la fuerza del oleaje alrededor del atolón; ya que al comparar la distribución estacional promedio del oleaje observado y la distribución estacional promedio de la fuerza del oleaje con la distribución de los surcos, estos coincidían significativamente; por lo tanto, la distribución direccional de la fuerza del oleaje se correlaciona significativamente con los surcos arrecifales. Encontraron que la distribución de los surcos revela un máximo de exposición al oleaje en direcciones Este–Noreste y Sureste, las cuales están asociadas con las principales áreas generadoras de oleaje; como lo son, los cinturones de los vientos alisios del Pacífico norte y sur sobre el atolón Bikini. La distribución de los surcos respecto a la fuerza del oleaje reveló las mismas características; excepto durante los meses de verano, ya que los vientos alisios sobre el Pacífico sur son opacados por los vientos alisios locales. De acuerdo con estos autores, la longitud y espaciado de las formaciones de macizos y surcos pueden correlacionarse con la fuerza del oleaje alrededor del atolón Bikini.

Nasser y Hatcher (2000), utilizaron imágenes satelitales del sensor Landsat-7 para mapear con precisión la morfología del arrecife superficial del archipiélago de las Maldivas. Midieron el ancho de la pendiente y de la cresta arrecifal, así como su relación entre ambas; en comparación con datos de la influencia del oleaje local, velocidad del viento, así como, altura y energía del oleaje. Encontraron concordancias de la predicción de asimetrías en la zonación arrecifal, las cuales de acuerdo con ellos, reflejan las asimetrías por el forzamiento del Monzón estacional sobre el área. Identificaron en la técnica de PR la limitante de 40 m en la penetración de la columna de agua, no obstante, propusieron que el análisis remoto es el único método que puede generar los datos requeridos para estudios a gran escala. Manifestaron que su trabajo era un puente entre los estudios de geología estructural y el crecimiento biológico de los arrecifes coralinos mediante el uso de la innovadora técnica de análisis y medición por PR. Finalmente, sugieren que los patrones morfológicos observados reflejan una respuesta integrada del tiempo de crecimiento arrecifal con forzadores ambientales.

Storlazzi *et al.* (2003), mediante batimetría Laser, estudiaron la morfología de las estructuras de macizos y surcos en el arrecife costero al sur de la isla Molokai en Hawaii, con un alto nivel de precisión. Midieron la altura de 4800 formaciones de macizos y surcos, y la distancia de cresta a cresta de macizos adyacentes, en otras palabras, “longitudes de onda” a lo largo de cuatro isobatas. Observaron lo siguiente:

- 1) El ancho de la planicie arrecifal decrece con el incremento de la energía de oleaje.
- 2) El promedio de la altura y la longitud de onda de los macizos y surcos fueron inversamente proporcional con la energía de oleaje.
- 3) En ambientes de alta energía la morfología de los sistemas de macizos y surcos permanece relativamente constante a través de cualquier profundidad.
- 4) En ambientes de menor energía las

estructuras de macizos y surcos presentan mucha mayor variación. 5) Los macizos y surcos son relativamente pequeños y delgados (estrechos) en profundidades someras; viceversa en aguas profundas; por lo que, a) en agua somera expuesta al oleaje, los surcos son más amplios que el ancho de macizos, y b) en agua profunda, los surcos son más estrechos y los macizos puntiagudos. Sugieren que al parecer, el oleaje ejerce un control primario en la morfología, a pequeña y gran escala en el arrecife sur de Molokai.

Rogers *et al.* (2014), midieron *in situ* los procesos hidrodinámicos sobre los sistemas de macizos y surcos en el atolón Palmira. Observaron lo siguiente: 1) Sobre los macizos la circulación paralela a la costa ocurre de manera ciclónica, lo que sugiere que en el lado opuesto del macizo la circulación sea anticiclónica. 2) Los corales prosperan sobre los macizos y no sobre los surcos, quizás por las diferencias en los parámetros de velocidad cercana al fondo, turbulencia y estrés de cizalla de fondo, independientemente de los niveles de luz que son mayores sobre los macizos. 3) Sobre los macizos se da una mayor disponibilidad de nutrientes porque la velocidad promedio a lo largo de la costa que fluye verticalmente hacia abajo es mucho mayor por la alta turbulencia, y existe una baja acumulación de sedimentos debido al mayor y más variable estrés de cizalla de fondo que ocurre sobre los macizos. Sugieren que las formaciones de macizos y surcos parecen disminuir el movimiento horizontal de las olas, más de lo que la teoría de oleaje lineal predice.

Duce *et al.* (2014), mediante un método de digitalización manual sobre imágenes de alta resolución, midieron la distribución y longitud de los surcos de cuatro arrecifes al sur de la Gran Barrera de Arrecifes de Australia y determinaron su relación con la exposición al oleaje relativo. Observaron lo siguiente: 1) Los Sistemas de macizos y surcos se encuentran menos definidos y menos regulares o ausentes en ambientes menos expuestos. 2) Las mayores longitudes promedio de los surcos ocurren en los lados orientales de los arrecifes, en donde hay mayor exposición al oleaje. Sugieren una fuerte correlación positiva entre la exposición relativa de la energía del oleaje y la longitud de los surcos.

HIPÓTESIS

La morfología del sistema de macizos surge como una característica emergente generada por la interacción del oleaje con el crecimiento coralgal; por tanto, la morfología debe mostrar cambios sistemáticos y presentar un determinado patrón de acuerdo con la variación vectorial del oleaje incidente en distintas orientaciones del arrecife frontal.

OBJETIVOS

1. Encontrar un procedimiento accesible y elemental basado en software libre que permita un análisis cuantitativo de estructuras de macizos.
2. Cuantificar la distribución y morfometría del sistema de macizos con base en la orientación, en el arrecife frontal de un atolón del Indo-pacífico.
3. Detectar si existen patrones en la morfometría del sistema de macizos.

2 MATERIAL Y MÉTODO

2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL Y FUNDAMENTACIÓN

En primer lugar se comprobó que los estimadores para caracterizar los sistemas de macizos a partir de GE fueran los adecuados; lo anterior se realizó comparando las dimensiones de una estructura a través de GE contra las dimensiones de la misma estructura *in situ*. La medición se realizó bajo condiciones similares en las que se encuentran los objetos de muestreo; esto es, midiendo una estructura acanalada sumergida en el agua.

Dicha estructura con características de canal está localizada aproximadamente a 20°49'49''N, 86°52'46''O , en el frente arrecifal de Puerto Morelos, Q. Roo., a 1 km de la costa y con una profundidad de entre 5 a 6 m. Se midieron un total de 30 longitudes de ancho de canal (fig. 7).

Para esta tarea se utilizó una cinta de flexometro adherida a una cuerda sintética resistente, la cual se ató en ambos extremos a dos mástiles de PVC de 1.5 m de largo, a los cuales se les acoplaría justo antes de la toma de datos otra extensión de PVC de 1.5 m, con la finalidad de que el observador en superficie determinara las medidas con un sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) justo por encima del punto inicial y final de cada medición de longitud. Para su posterior localización en GE y comparación de las mediciones de longitud real vs longitud digital, y establecer un porcentaje de error.

Se obtuvo un error promedio del 2.77% que representa en promedio menos de 0.2 m, quedando claro que la comparativa entre las medidas reales efectuadas en campo contra las medidas digitales con la herramienta de distancia de la plataforma GE resultan muy parecidas y aceptables ya que las estructuras a medir van de los 4-8 m en promedio, escala muy por encima del error estimado. Por lo que las imágenes de GE resultaron viables para el estudio en cuestión.

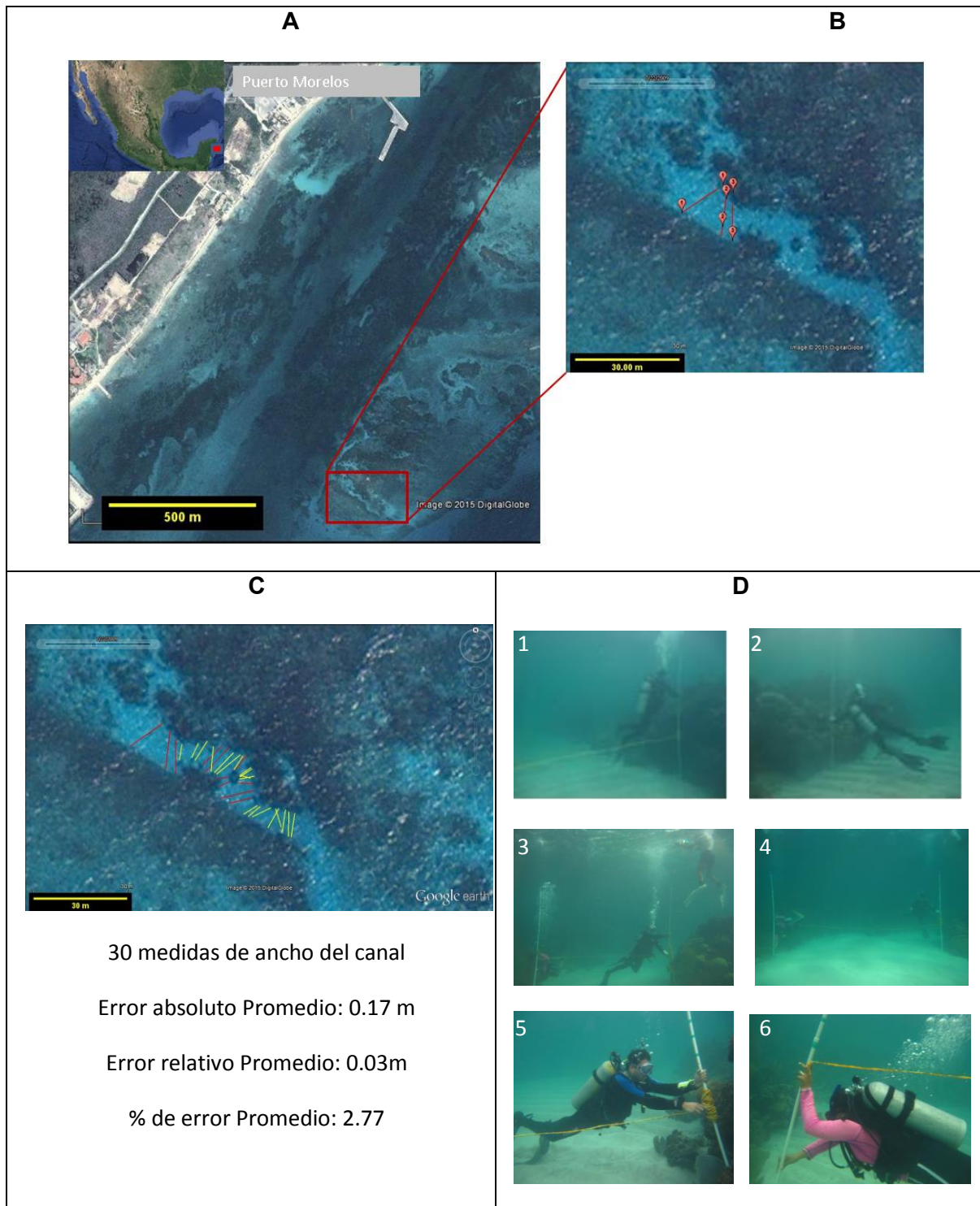


Figura 7. Localización y medición de un canal en aguas someras con alrededor de 70 m de longitud. A) Imagen de GE del Canal medido, localizado a $20^{\circ}49'49''N$, $86^{\circ}52'46''O$, con temporalidad en la imagen de 7/22/2009. B) los puntos por duplicado indican el primer y último registro del GPS en superficie para cada uno de los transectos medidos; nótese un desplazamiento de los puntos duplicados, el trazo se ilustra a través de los puntos GPS y éste no inicia necesariamente sobre éstos. C) En total 30 mediciones de ancho de canal; los distintos colores representan distintos días de medición de longitudes, tomando en cuenta el límite de transición entre el arenal y la estructura arrecifal. D) Fotografías del muestreo, 1-2) se midió desde el límite entre la estructura arrecifal y el arenal. 3-4) Registro de longitud bajo el agua y de posición en superficie con GPS. 5-6) Colocación del sistema

para efectuar la medición. Imágenes A, B y C, copyright de GE, DigitalGlobe, 2014.

2.2 DETECCIÓN DEL SISTEMA DE MACIZOS

Una vez conocido el error aproximado de las mediciones con imágenes de GE, se procedió a ubicar visualmente en el registro espacial y temporal las estructuras de macizos y surcos a lo largo del perímetro arrecifal de atolones e islas de la región del Indo-pacífico, tomando en cuenta que una imagen del mismo lugar suele ser muy diferente en cuanto a detalle y posibilidad de observar las estructuras de macizos dependiendo de la fecha de captura (figura 8).

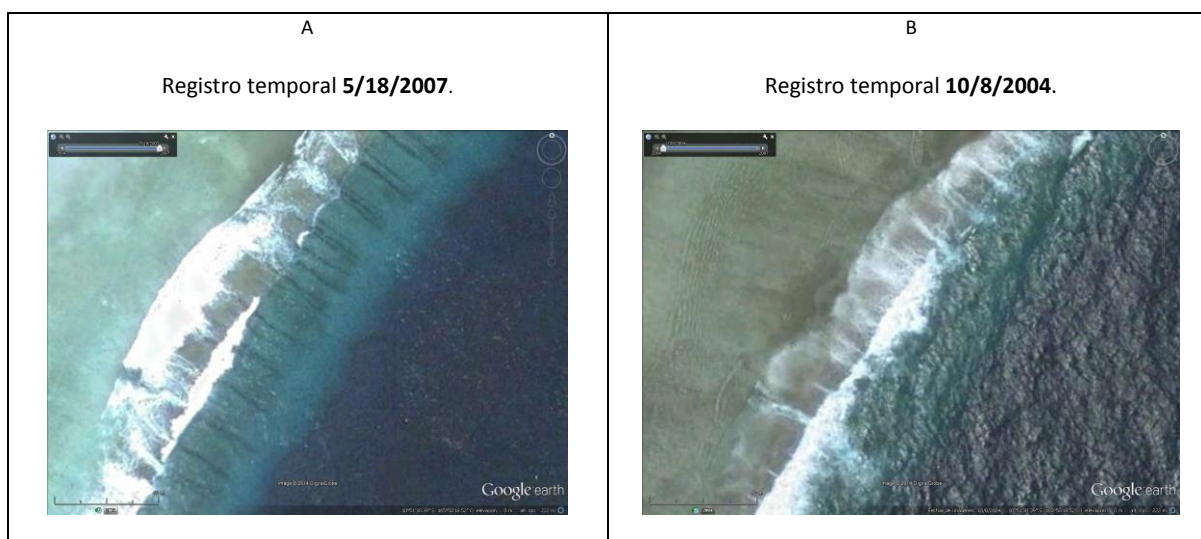


Figura 8. Búsqueda en el registro temporal disponible de GE; como ejemplo, registro de sistemas de macizos y surcos en el atolón Puka puka, perteneciente a las Islas Cook de Nueva Zelanda, con ubicación en la zona Sur-oriental a 10° S, 165° O. A y B son imágenes del mismo lugar con distinto registro temporal. Imágenes Copyright de GE, DigitalGlobe, 2014.

2.3 LOCALIZACIÓN Y MARCAJE DE LOS SISTEMAS DE MACIZOS

Se ubicaron un total de 126 atolones e islas con presencia de sistemas de macizos y surcos (figura 9); sin embargo, solo tres de ellos presentan más del 50% de su perímetro arrecifal con presencia de sistemas de macizos y surcos en imágenes claras (figura 10), ver tabla 3.

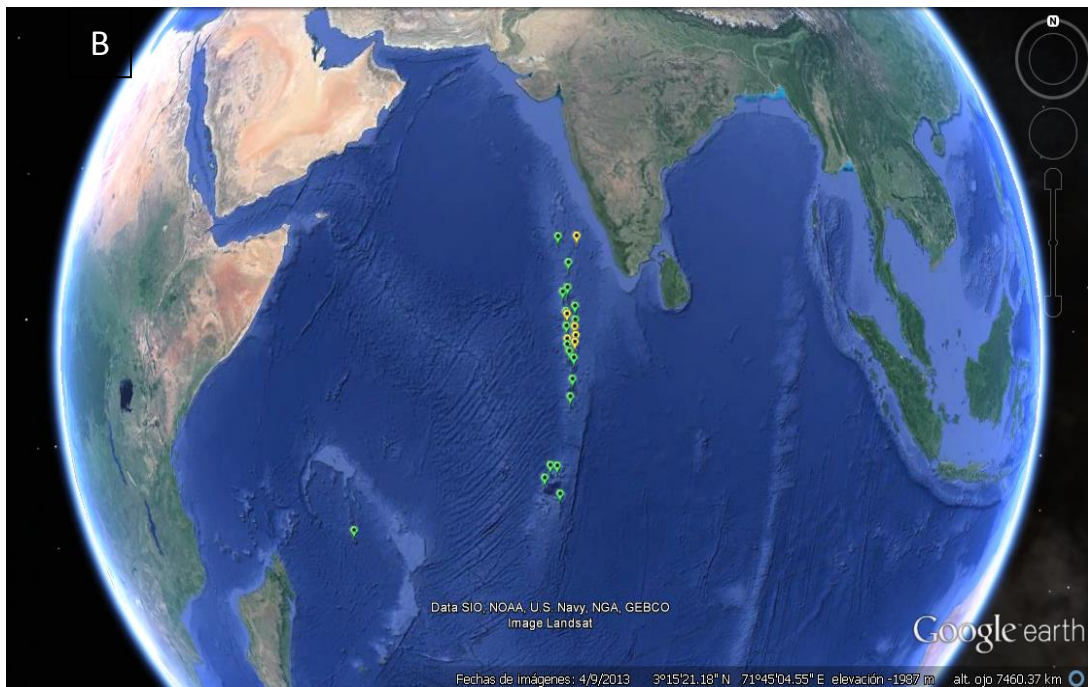
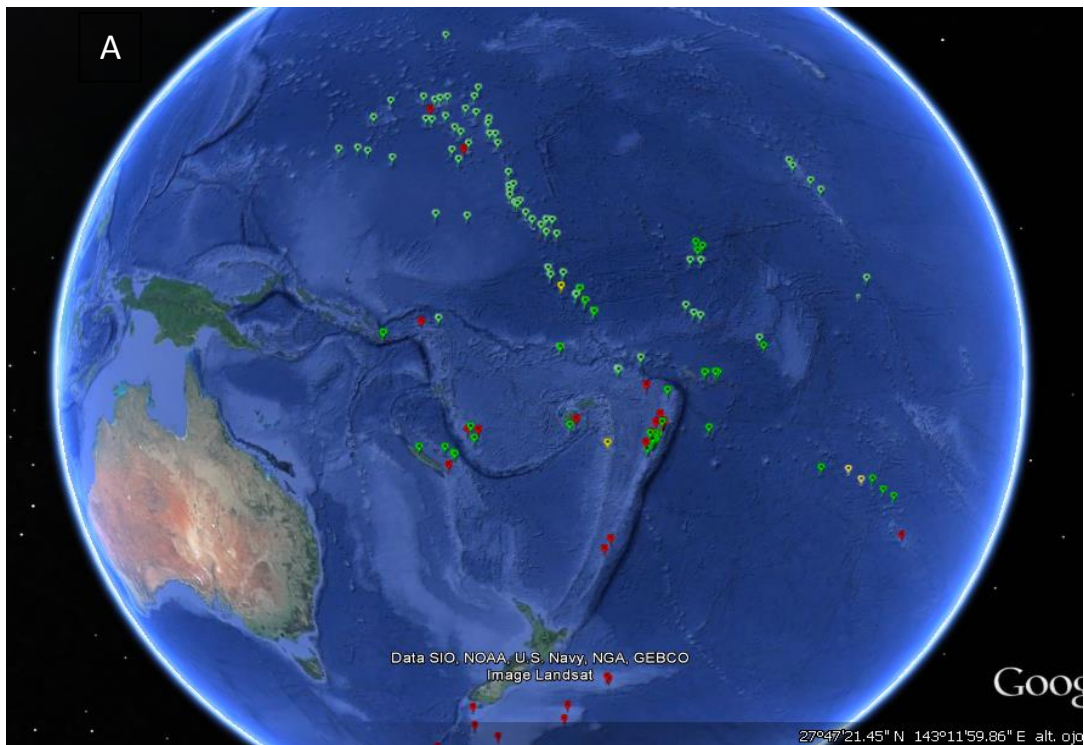


Figura 9. Localización de estructuras de macizos y surcos. A) Océano Pacífico occidental. B) Océano Índico. El color rojo indica la ausencia de sistemas de macizos (28 islas). El color verde indica la presencia de sistema de macizos (126 atolones e islas). El color amarillo indica la presencia de sistemas macizos, pero la ausencia de imágenes claras para poder determinar un análisis cuantitativo (10 atolones). Imagen Copyright de GE, Landsat, 2015.

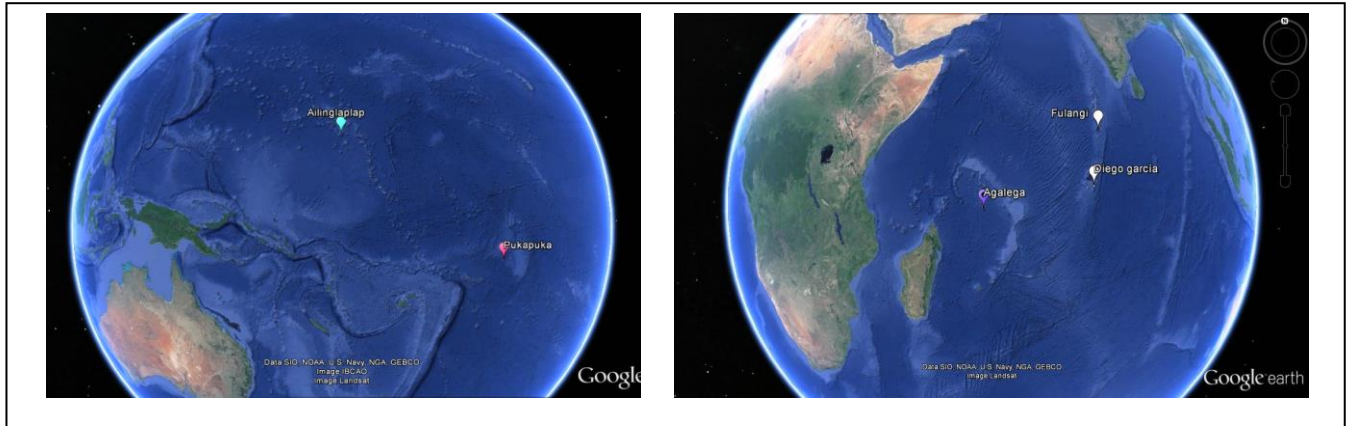


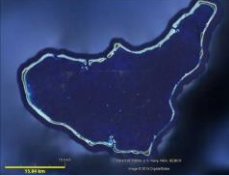
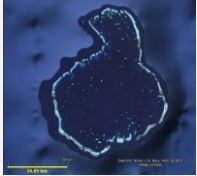



Figura 10. Localización de estructuras de macizos y surcos en tres atolones. En color rosa, Atolón Puka puka con 15 km de estructuras (60.5% de su perímetro arrecifal). En color verde, el atolón Ailinglaplap con 52.1 km de estructuras (50.23% de su perímetro arrecifal). En color violeta, el atolón Agalega con 33.9 km de estructuras (98% de su perímetro arrecifal). En blanco, los atolones Fulangi y Diego Garcia con 82.3 km (48.7% de perímetro arrecifal) y 21.2 km (44.2% de perímetro arrecifal) de estructuras de macizos y surcos respectivamente. Imagen Copyright de GE, Landsat, 2015.

Tabla 3. Extensión de sistemas de macizos y surcos en más del 50% del perímetro arrecifal en dos atolones y una isla del Indo-pacífico. Se muestran también dos atolones con casi el 50% de sistemas en imágenes claras.

Atolón/Isa					
	Agalega	Puka puka	Ailinglaplap	Fulangi	Diego Garcia
Perímetro arrecifal observado (m)	34659	24789	103806	168820	47899
Extensión de sistemas en imágenes claras (m)	33965	14999	52144	82282	21177
% Sistemas de macizos y surcos en imágenes claras	98	66	50.23	48.7	44.2

El Atolón Puka puka perteneciente a las Islas Cook de Nueva Zelanda es el segundo con mayor porcentaje de sistema de macizos en imágenes claras cuantificables, y sobre la región de éste atolón se tienen documentadas estimaciones generales del

clima de oleaje promedio anual; información que se desconoce para la región del atolón Agalega y los demás considerados. Para información del clima de oleaje y generalidades del área de estudio, ir a la sección 1.1.3, página 13.

2.4 PRE-PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES

Una vez localizadas las estructuras de macizos en los arrecifes frontales con imágenes de la plataforma GE, el siguiente paso consistió en averiguar cómo medir y cuánto miden, a través del software libre de procesamiento y análisis de imágenes **ImageJ**, con la finalidad de convertir imágenes de un mapa visual a un mapa cuantificable; en otras palabras, utilizar éste software para mejorar la calidad en la medida de lo posible y/o resaltar por medio del contraste lo que se desea medir y poder cuantificar las propiedades morfométricas de los sistemas de macizos.

Se buscó estandarizar un procesamiento digital de las imágenes por ensayo y error de distintas formas que permitieran aproximarse de la manera más sencilla al objetivo deseado. En la búsqueda del procedimiento más adecuado se intentó automatizar el procesamiento; sin éxito, debido por un lado, a la naturaleza tan variable del sistema que se intenta capturar en imagen, en donde la línea de rompiente y nivel de la columna de agua difieren constantemente de imagen a imagen; y por otro, a las características de cada imagen en cuanto a luminosidad y nivel de contraste, el cual puede ser distinto de una imagen a otra, incluso si una precede a la otra.

Con el conocimiento adquirido y con la comprensión de los alcances y limitantes de la resolución de las imágenes, así como de los procedimientos verificados, se propone un protocolo de muestreo y procesamiento de imágenes que permite extraer las características morfométricas necesarias para el análisis cuantitativo.

2.5 MUESTREO

Desde la plataforma GE se llevó a cabo la ubicación de las estructuras de macizos y surcos en el registro temporal, y con la herramienta para trazar longitud se etiquetó de forma discreta un transecto de aproximadamente 100 m de largo en cada imagen (fig.11). Para la captura de las imágenes en formato JPG se adoptaron los siguientes puntos: primero, la dirección de la imagen siempre apuntando hacia el norte, con una inclinación de 90°, y segundo, manteniendo siempre la herramienta de longitud de GE con una dimensión de 30 m; con la finalidad de que el nivel de detalle en el acercamiento, el cual no depende de la calidad de la imagen permaneciera homogéneo y uniforme para todas las imágenes, ver figura 11. Durante la captura,

las imágenes se rotularon para su almacenaje y posterior procesamiento.

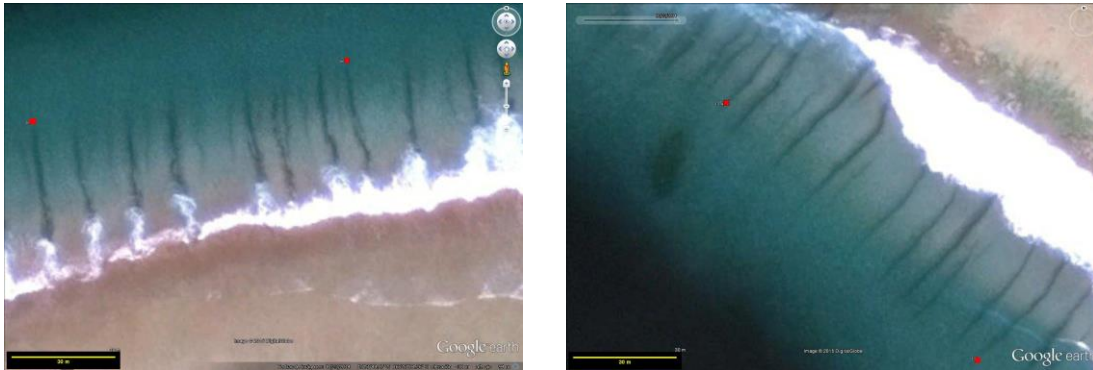


Figura 11. Captura de imágenes en formato JPG. La dirección de la imagen siempre apuntando hacia el norte, con una inclinación de 90 °, y manteniendo la herramienta de longitud de GE con una dimensión de 30 m. Se observa la colocación de marcas discretas que indican la longitud de un transecto de aproximadamente 100 m.

Por cada transecto de 100 m, como era de esperarse, existieron macizos que no entraban en él y quedaban fuera del transecto; por ello, se tomó en cuenta el macizo si y solo si dentro del transecto de 100 m entraba más del 50% del macizo, de lo contrario, éste macizo se contaría dentro del transecto siguiente. Por esta razón los transectos son de aproximadamente 100 m (± 5 m aprox.), ya que su longitud depende del ancho de macizo que entre o salga en el extremo final del transecto. Por otro lado, si la longitud de 100 m “caía” en donde no existiese ningún macizo, la marca de medición se dejaba justo ahí.

Durante el marcaje con frecuencia existieron cambios en la temporalidad de las imágenes, ya sea por falta de una imagen clara o porque los mosaicos de GE así están diseñados y suele truncarse la observación; por lo que, al seguir las marcas del segmento anterior se podía dar seguimiento a la estructura de macizo que seguía en el nuevo transecto; ya sea que hubiese un ligero desfase en cuanto a posición o no; de esta forma no existieron estructuras de macizos que se contaran de más o de menos.

2.6 PROCESAMIENTO EN ImageJ

El procesamiento se realizó sobre las imágenes capturadas y rotuladas en formato JPG como se describe a continuación:

- 1) **Calibración en imageJ con base en la barra de longitud de GE:** La calibración inicial se realizó tomando como base la herramienta de longitud de GE; tras esta operación queda definido el valor de pixel/metro en la imagen,

como se observa en la figura 12.

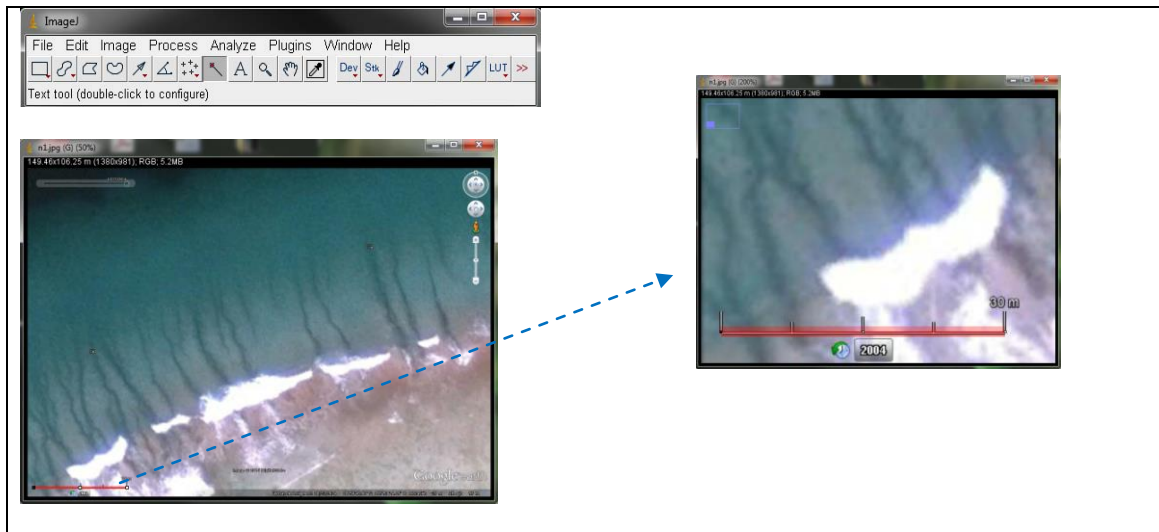


Figura 12. Calibración, donde se define el valor de pixel/metro en la imagen a procesar.

2) **Delimitación de segmentos:** Con la ayuda de la herramienta para definición de umbral ajustada en nivel 30, se retira la zona del oleaje (fig. 13), y encima de ésta se traza un track de 5 m de ancho. Este nuevo trazo sirve como base a partir de la cual se proyectara un segmento de 20 m de ancho delimitado por las marcas colocadas durante el muestreo y marcaje en GE (100 m aproximadamente). Teniendo así, segmentos que delimiten la estructura del sistema de macizos.

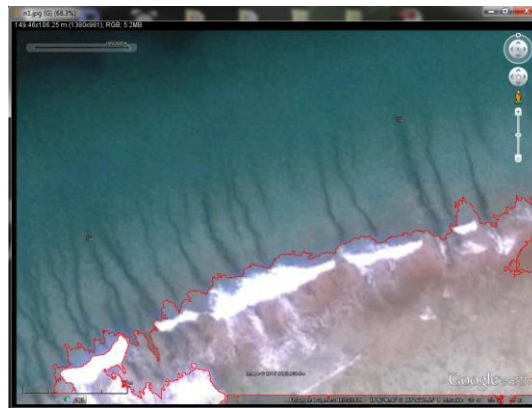


Figura 13. Por diferencia en uniformidad de color se separa la línea de rompiente de los sistemas de macizos y surcos.

El trazo de 5 m de ancho marcado inicialmente funciona para cubrir la espuma de la línea de rompiente que impide la observación clara del sistema de macizos y

surcos; se estableció este ancho por observaciones previas de todos los sistemas; en los cuales la espuma de la rompiente del oleaje no suele rebasar esa distancia de 5 m (fig. 14).

Por otro lado, el ancho de 20 m del segmento se justifica por lo siguiente:

Si el macizo es más ancho que largo, éste no se puede vectorizar con ImageJ, ya que el software toma en cuenta el lado más largo para determinar la orientación; por lo que, el ancho del segmento aislado (paso 2) debía ser mayor a las dimensiones de ancho de los macizos; en otras palabras, de resultar una figura cuadrada o rectangular con el lado largo paralelo a la línea de costa, entonces el ángulo no correspondería con la orientación aparente del sistema. Además, a una distancia mayor a 20 m la mayoría de los macizos ya no son detectados, quizá porque aumenta la profundidad de la columna de agua (fig. 15).

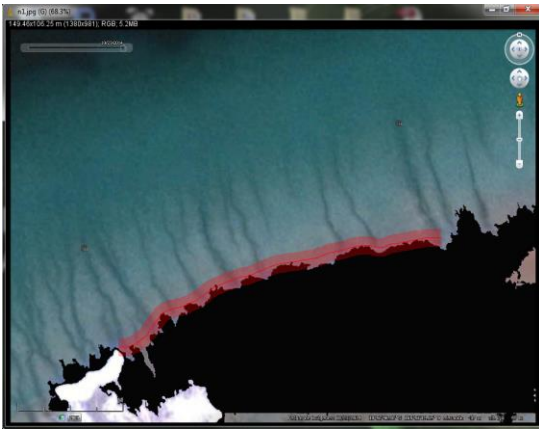


Figura 14. Trazo de 5 m sobre la línea de rompiente, el cual cubre la espuma residual de la rompiente. Sobre éste se proyectara el segmento que aislara al sistema de macizos y surcos.

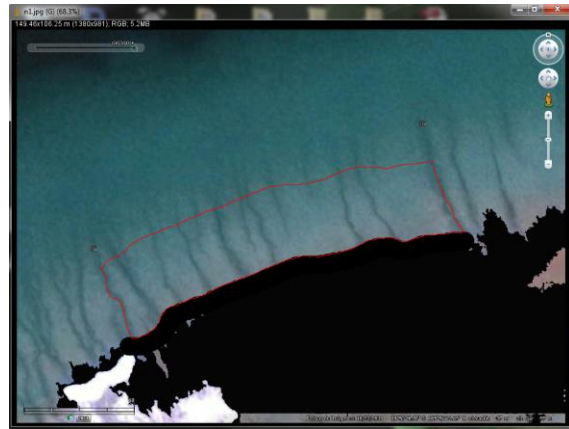


Figura 15. Segmento de 20 m de ancho. Creando una delimitación del sistema para eliminar el ruido de fondo. El ancho es una magnitud adecuada para extraer el valor de orientación.

El aislamiento de este segmento del resto de objetos de la imagen permite eliminar el ruido de fondo y mejorar el contraste llevado a cabo posteriormente.

3) Aislamiento y contraste del segmento: Una vez aislado el segmento, se retira lo que queda al exterior de éste (fig. 16). Se lleva a cabo la operación de contraste de forma automática supervisada, hasta que la pendiente de calibración toque en su parte inferior el inicio de la curva que describe a la imagen y a su vez, se posicione lo más cerca posible a la curva de la imagen (fig. 17).

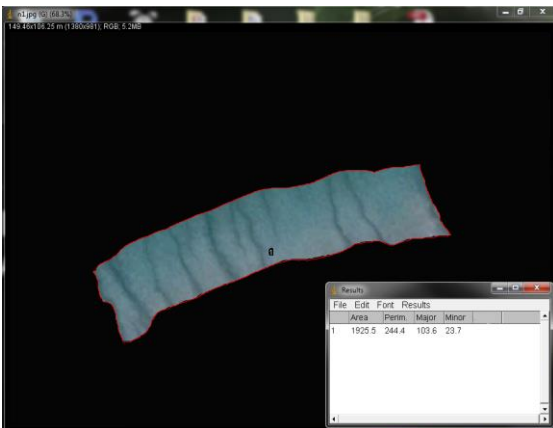


Figura 16. Aislado y eliminación del exterior del segmento.

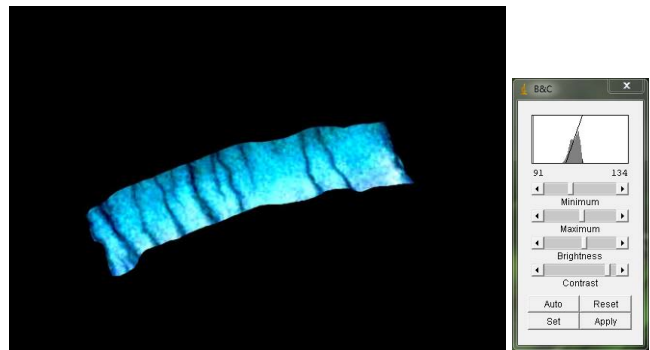


Figura 17. Contraste automático supervisado.

4) Binarización y separación de macizos: Se aplica la operación de binarización y se valida el binarizado con la sobre-posición de éste último con la imagen nativa (fig. 18).

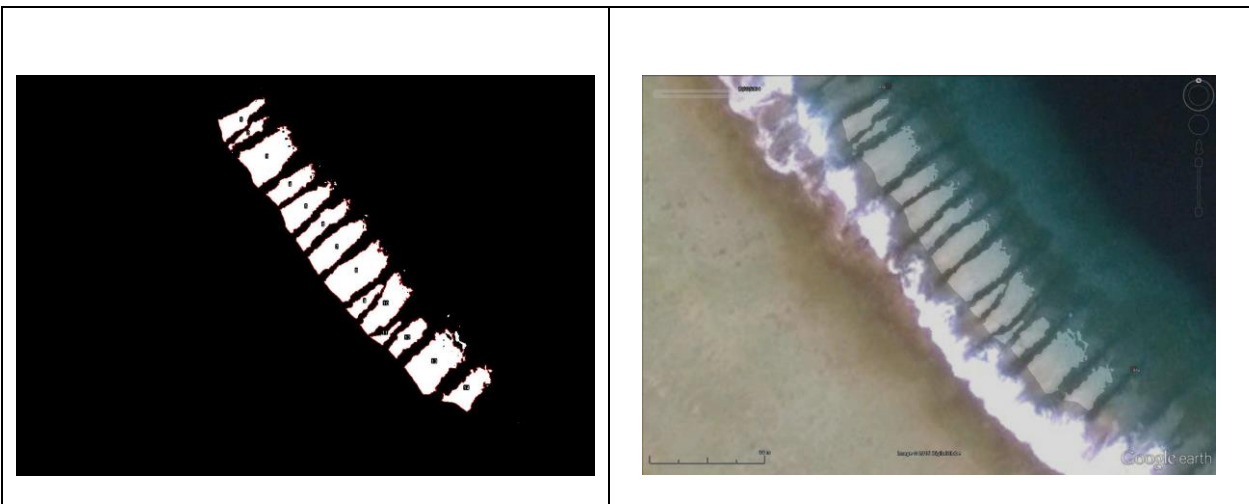


Figura 18. Binarización y validación de las estructuras del sistema de macizos.

En ocasiones resulta necesario corregir mediante la separación de los macizos que permanecen unidos del lado de la rompiente; ya que de no hacerlo el análisis de orientación arroja vectores paralelos a la línea de costa y no perpendiculares a ésta como se espera (fig. 19).

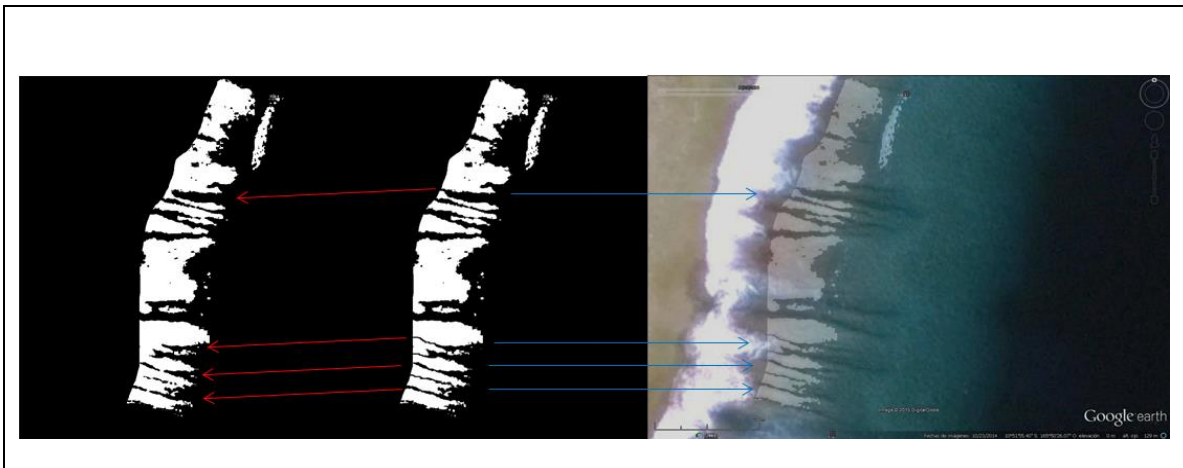


Figura 19. Corrección por separación del sistema de macizos cercanos a la zona de rompiente.

5) Obtención de parámetros morfométricos; En el sentido de las manecillas del reloj, de los segmentos se extrae la información del área, ancho y orientación de cada macizo.

El ancho de macizo se extrae gracias a que el software hace una aproximación de cada macizo como si éste tuviera una figura rectangular, pudiendo extraer de ello el ancho calculado de cada macizo y el largo, sin embargo esta última medida fue establecida al definir el ancho del segmento de 20 m, por ende no resulta útil.

La orientación de los macizos se obtiene en grados; no obstante, se deben efectuar dos correcciones; la primera, debido a que el software solo proporciona las orientaciones que van de 0 a los 180, por lo que, para obtener los valores que van de 180 a 360 es necesario aplicar la corrección necesaria en la hoja de cálculo de la base de datos (fig. 20).

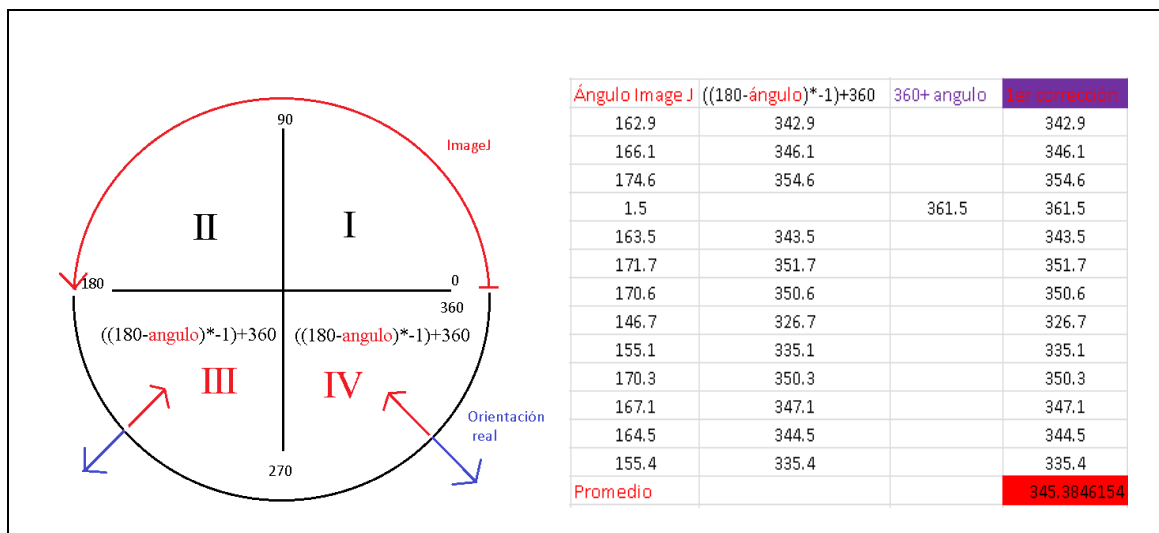


Figura 20. Primera corrección de la orientación sobre la hoja de cálculo de la base de datos. Mediante la operación $[(180-\text{ángulo Image j}) \times -1] + 360$ se obtiene el ángulo de 180 a 360°.

La segunda es una corrección para obtener el rumbo geográfico; debido a que éste último va en sentido horario comenzando con 0° en el Norte, como se observa en la figura 21.

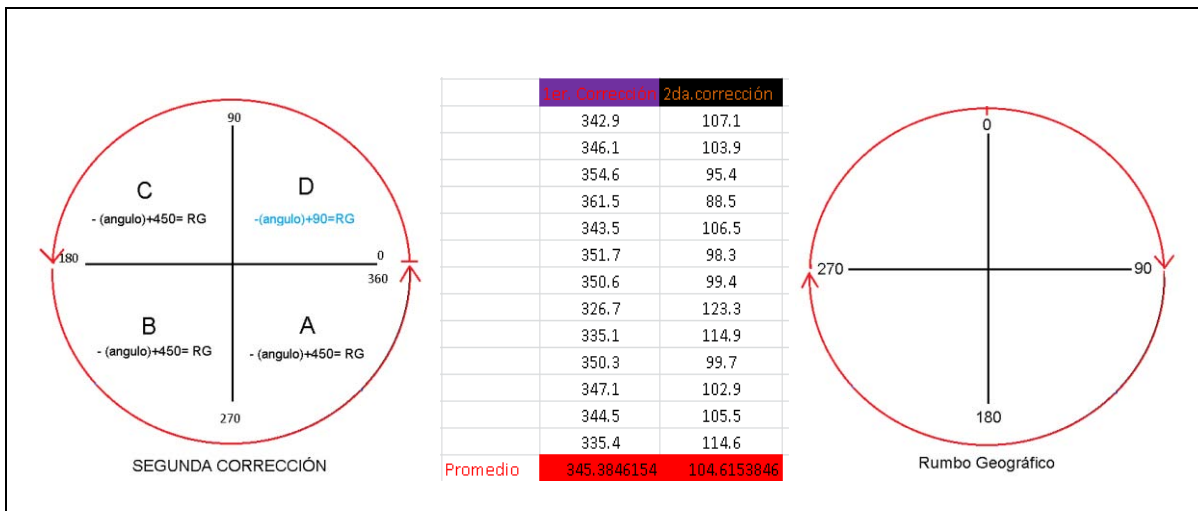


Figura 21. Segunda corrección de la orientación sobre la hoja de cálculo de la base de datos. De acuerdo con el cuadrante del que se trate, se aplica la operación y se obtiene la orientación geográfica de los macizos.

6) **Archivando imágenes:** Los segmentos binarizados y las sobre-posiciones, o dicho de otra forma, los segmentos acotados, junto con los registros validados y corregidos se capturan y rotulan para cualquier observación posterior.

Los valores obtenidos se integran a una base de datos general, y posteriormente en una base de datos depurada y corregida.

2.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez obtenido y almacenado el cálculo de los valores morfométricos de todo el sistema de macizos, se cuantifico la distribución de cada macizo de acuerdo con su orientación en cuatro puntos cardinales.

A fin de tener una mayor resolución en el detalle de la distribución, dispersión y orientación del sistema de macizos, éstos se ordenaron de acuerdo con su orientación radial en 16 rumbos geográficos; obteniendo una visión más clara y descriptiva de la frecuencia, mediana del área y mediana del ancho de macizos; haciendo posible la observación de patrones en los parámetros morfométricos. Se utilizó la mediana debido a que es un estimador de medida central más robusto al ruido que la media, y adecuado para el desbalance que presenta el dataset.

Para la observación de la distribución morfométrica del sistema de macizos por cara del arrecife, se representó gráficamente el área, ancho y orientación por cada una de las cinco caras del arrecife.

Se llevó a cabo una prueba Kruskal-Wallis (fig. 22), con la finalidad de conocer la existencia de diferencias significativas entre los parámetros morfométricos y la cara del arrecife, para establecer una relación entre los grupos en caso de existir. La elección de la prueba fue como resultado del análisis exploratorio del dataset, ya que éste último carece de normalidad y por su desbalance y dispersión confirmada con un análisis de residuales, es que se atendió a la necesidad de realizar una prueba no paramétrica en la cual las condiciones del dataset cumplieran con los supuestos del modelo. Ya que a pesar del elevado número de datos, el desbalance en éstos crea preocupación en términos de que una prueba paramétrica como un Anova puede no ser válido.

<p>Prueba de Kruskal-Wallis para calcular el estadístico H</p> $H_{\text{obtenida}} = \left[\frac{12}{N(N+1)} \right] \left[\sum_{i=1}^k \frac{(R_i)^2}{n_i} \right] - 3(N+1)$ $= \left[\frac{12}{N(N+1)} \right] \left[\frac{R_1^2}{n_1} + \frac{R_2^2}{n_2} + \frac{R_3^2}{n_3} + \dots + \frac{R_k^2}{n_k} \right] - 3(N+1)$	
<p>Dónde:</p>	$\sum_{i=1}^k \frac{(R_i)^2}{n_i}$ <p>Indica elevar al cuadrado la suma de los rangos para cada muestra, y dividir cada valor cuadrado entre el número de observaciones en la muestra y sumar las muestras.</p>
<p>k= número de muestras o grupos n_i= número de observaciones en la muestra i n_k= número de observaciones en la muestra k N= número de observaciones en todas las muestras combinadas R_i= suma de los rangos para la muestra i R_k= suma de los rangos para la muestra k</p> <p>Si el número de puntajes en cada muestra es cinco o más, la distribución de muestreo del estadístico H es aproximadamente el mismo que ji cuadrada con $gl=k-1$. Por lo que puede obtenerse el valor $H_{\text{crítico}}$ de la tabla H con el valor $\alpha = 0.05$ y gl.</p>	
<p>Si $H_{\text{obtenida}} \geq H_{\text{crítica}}$ se rechaza H_0</p> <p>Si $H_{\text{obtenida}} < H_{\text{crítica}}$ se acepta H_0</p>	<p>H_0= las medianas de k grupos no son diferentes. H_1= al menos una de las medianas es diferente.</p>

Figura 22. Modelo de Kruskal-Wallis (Pagano, 2011; Ott y Michael, 2010).

Posteriormente se realizó una comparación múltiple de kruskal-Wallis con la intención de averiguar específicamente que medianas difieren de cuales otras; en otras palabras, determinar cuáles condiciones difieren de las demás.

3 RESULTADOS

El procedimiento propuesto se realizó sobre el Atolón Puka puka perteneciente a las Islas Cook de Nueva Zelanda; debido a que 66% de su perímetro arrecifal cuenta con sistemas de macizos que pueden cuantificarse, porque posee imágenes en alta resolución en las que los macizos son claros y evidentes. Además, sobre la región de estudio se cuenta con información acerca de las estimaciones generales del clima de oleaje promedio anual.

Se cuantificaron los parámetros morfométricos de área, ancho y orientación de 1517 macizos a partir del procesamiento de 247 imágenes nativas de GE, acotadas cada una por un segmento de 20x100 m (Tabla 4), en el perímetro arrecifal del atolón (fig. 23). De los 247 segmentos procesados, 163 contaron con al menos un macizo por segmento (Anexo 1, Tabla 9).

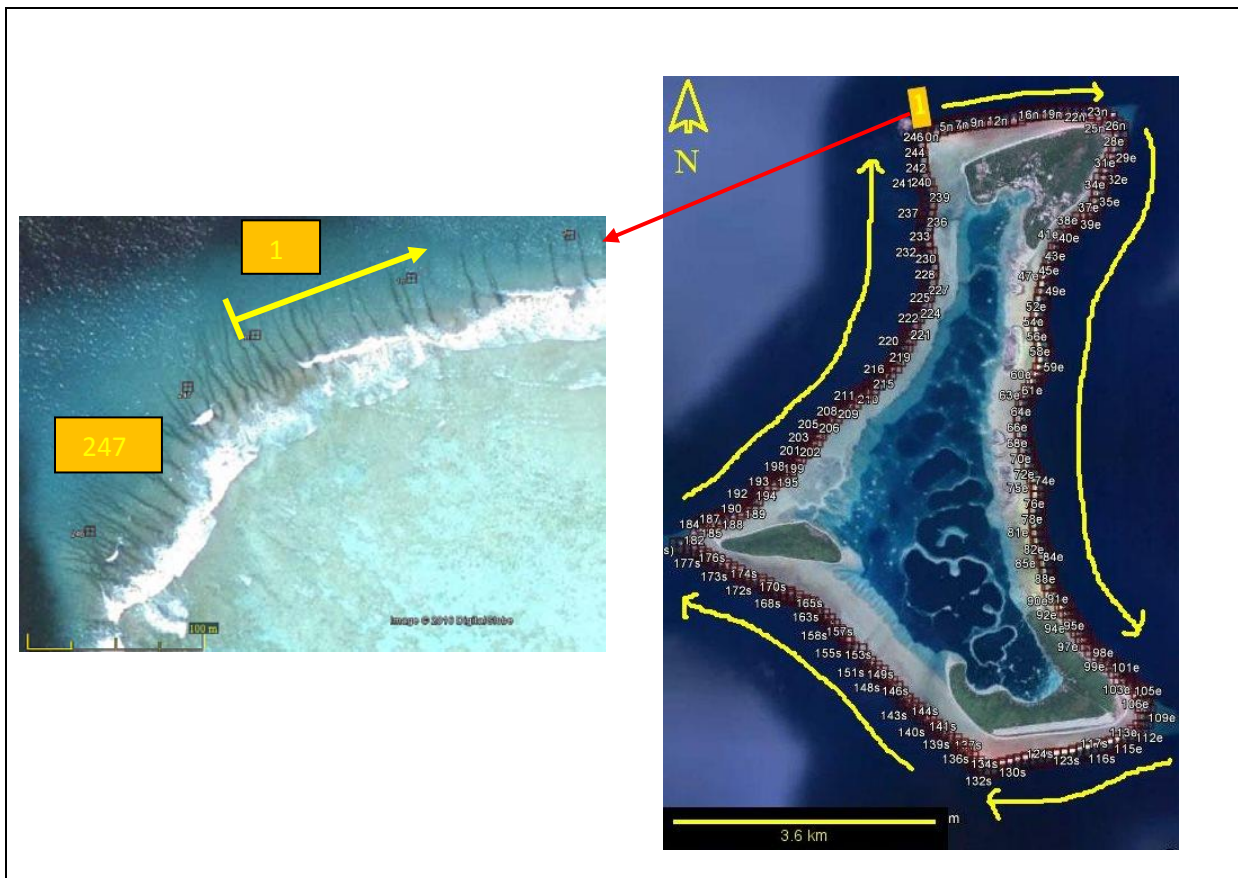


Figura 23. Punto inicial y dirección del muestreo de los 247 segmentos de 20x100 m del perímetro arrecifal del Atolón Puka puka.

Tabla 4. Parámetros morfométricos de 1517 macizos a partir de 247 segmentos del perímetro total del arrecife.

Parámetro morfométrico	Máximo	Mínimo
Frecuencia de macizos por segmento	26	1
Área de macizo	273.7 m ²	3.4 m ²
Ancho de macizo	16.1 m	1.1 m

3.1 DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE MACIZOS POR ORIENTACIÓN

Se cuantifico la distribución de cada macizo de acuerdo con su orientación en cuatro puntos cardinales (fig. 24).

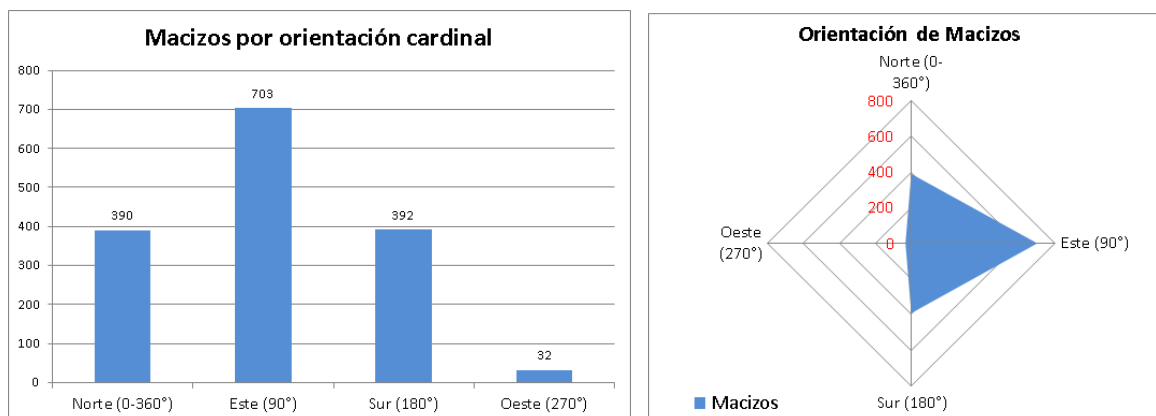


Figura 24. A la izquierda, los 1517 macizos por orientación cardinal del arrecife frontal del Atolón Puka puka. A la derecha, la orientación radial de los macizos.

La cantidad de 703 macizos se orientan hacia el Este, le siguen los que se orientan hacia el Sur y Norte con 392 y 390 macizos, respectivamente; mientras que 32 macizos son los que se orientan hacia el Oeste.

3.2 DISTRIBUCIÓN, DISPERSIÓN Y ORIENTACIÓN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS POR MACIZO

Con la finalidad de tener una mayor resolución de la distribución y orientación por macizo, éstos se ordenaron de acuerdo con su orientación radial en 16 rumbos geográficos (Anexo 2, Tabla 10); cabe mencionar, que si bien los datos se obtuvieron a través de los segmentos (los cuales sirvieron como una herramienta metodológica), éstos no representan la unidad muestral aunque su distribución sea análoga a la

distribución de macizos individuales (Anexo 3, figura 48). La distribución de los parámetros morfométricos de frecuencia, área y ancho de macizo se muestra en las figuras 25-29.

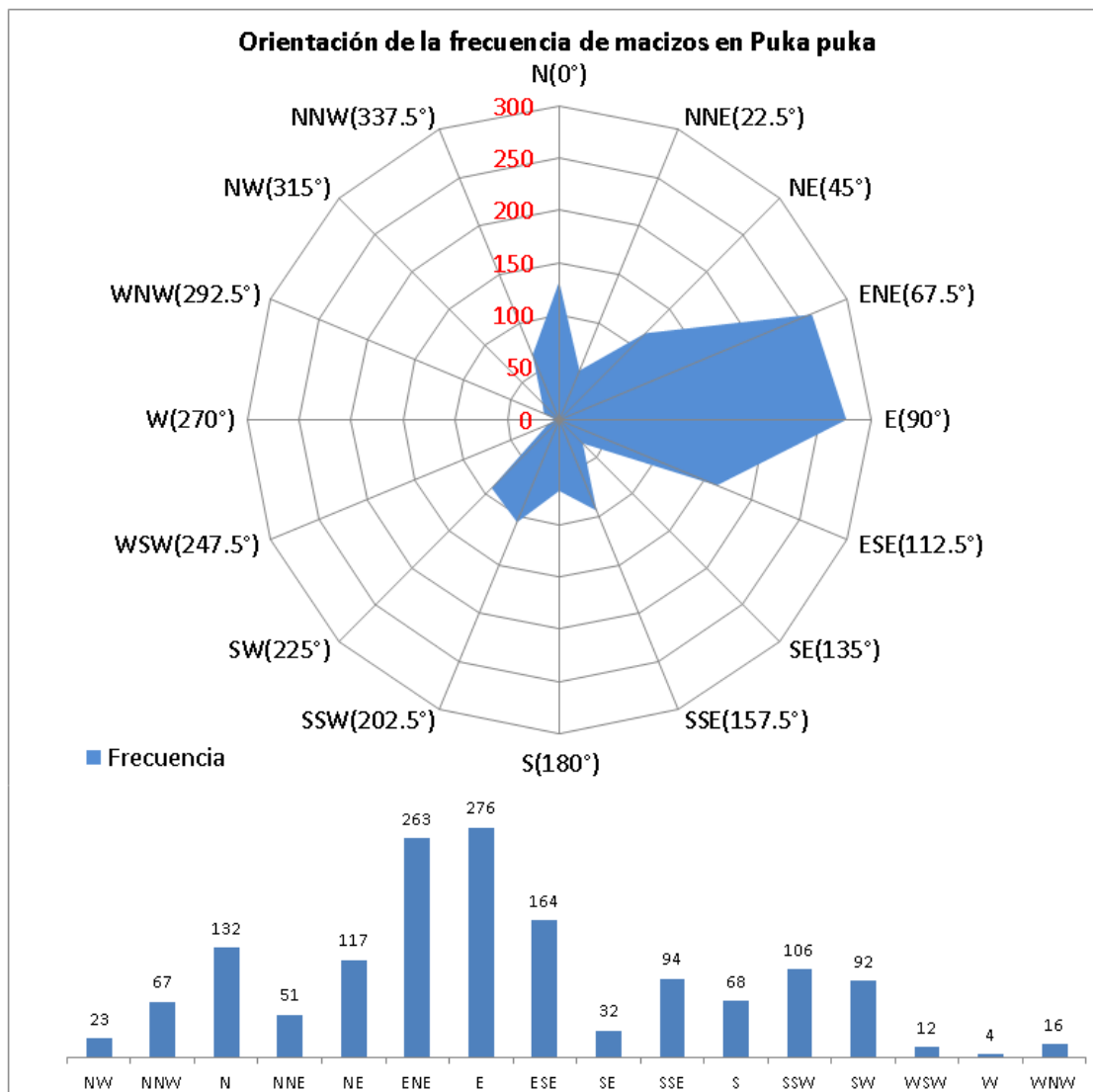


Figura 25. En orden descendente, orientación radial y distribución de frecuencia de los 1517 macizos de acuerdo con la orientación en 16 rumbos geográficos en el Atolón Puka puka.

La frecuencia de macizos por orientación geográfica es muy variable con un intervalo que va de 4 macizos hacia el Oeste, hasta 276 macizos en el Este.

Distribución y dispersión del área (m²) del sistema de macizos por orientación geográfica

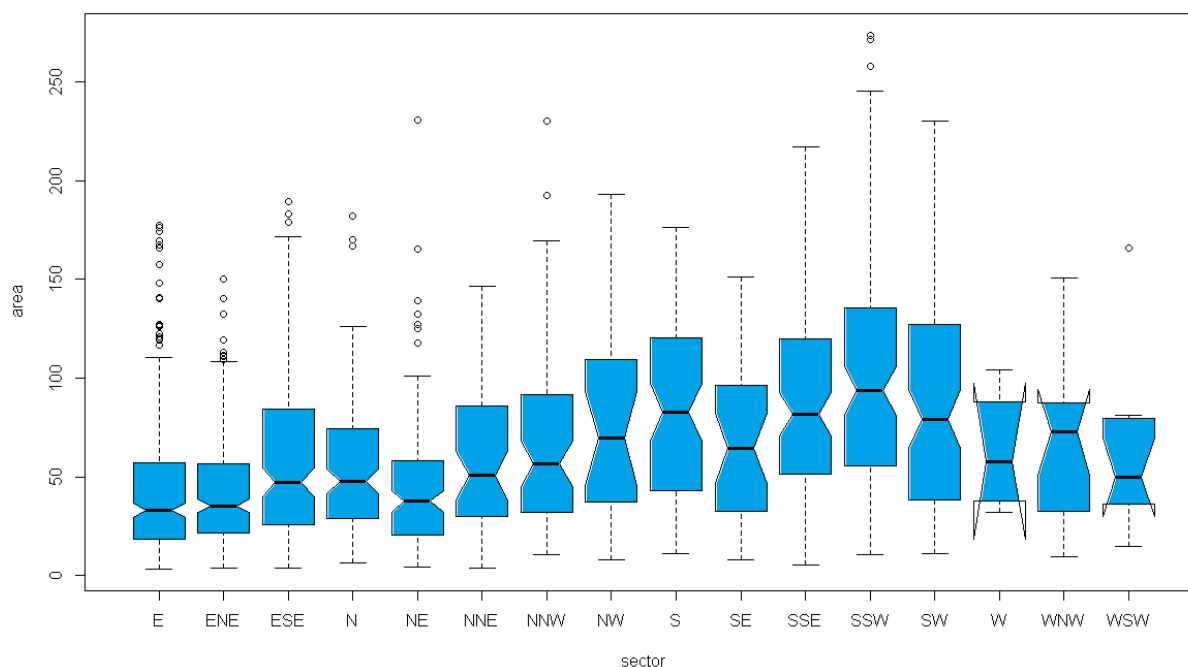


Figura 26. Boxplot del área del sistema de macizos por orientación geográfica.

La representación boxplot del área del sistema de macizos permite una clara observación de la distribución y dispersión real por cada uno de los 16 rumbos de orientación. Todos los sectores presentan una dispersión⁵ del área muy variable, incluso la presencia de outliers en la mitad de los rumbos indican una distribución muy heterogénea. La mediana⁶ también es muy variable entre los sectores; sin embargo, el notch⁷ o intervalo de confianza para las medianas se sobrelapa dentro de cada una de las orientaciones generales Norte (N-NW), Sur (S-SW) y Oeste (W-WSW), indicando con un valor α del 5% que las medianas no son significativamente diferentes; con excepción del Este (E-ESE), ya que el notch del ESE no se sobrelapa con el notch de los dos rumbos restantes que componen ésta orientación general.

⁵ Dispersión: Dada por la altura de la caja y por la distancia entre los extremos de los bigotes (Ott y Michael, 2010).

⁶ Mediana: Valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados. La mediana es más robusta al ruido que la media (Ott y Michael, 2010).

⁷ Notch: Medida de la desviación del rango intercuartil. Si el notch de distintos grupos no se traslapa, las medianas son significativamente diferentes a un nivel de 5%.

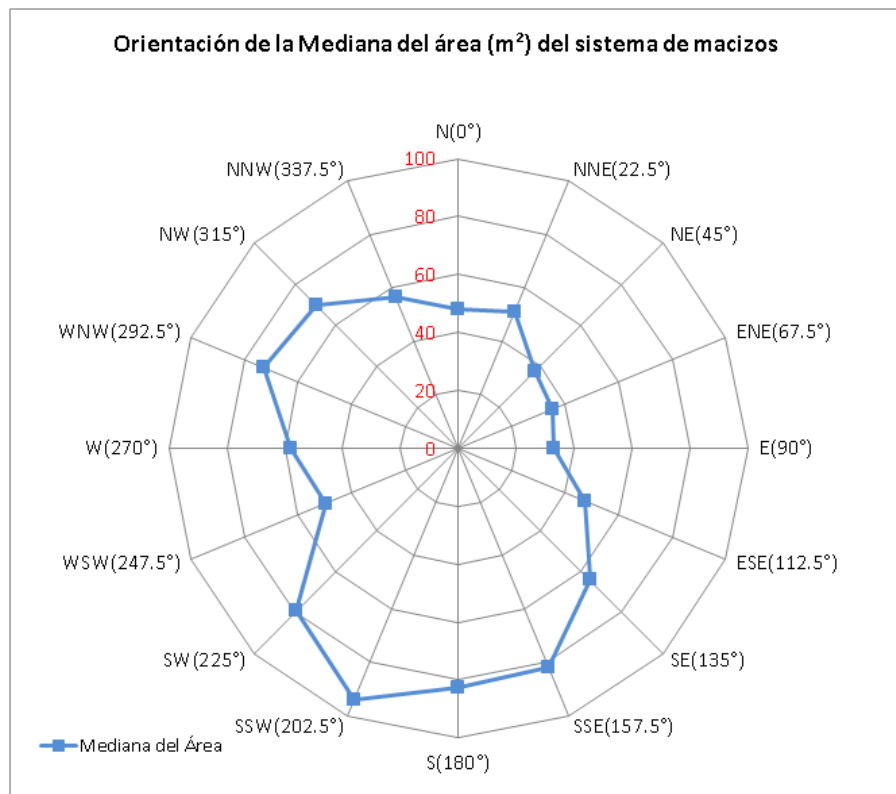


Figura 27. Orientación radial de la mediana del área del sistema de macizos en el atolón Puka puka.

La mediana del área del sistema de macizos presenta una tendencia a aumentar en el NW y WNW así como a lo largo de toda la orientación Sur (desde del SE-SW). Mientras que la mayor parte del Norte (NNW-NE), y sobre todo en el Este (ENE-ESE) presenta una tendencia de disminución.

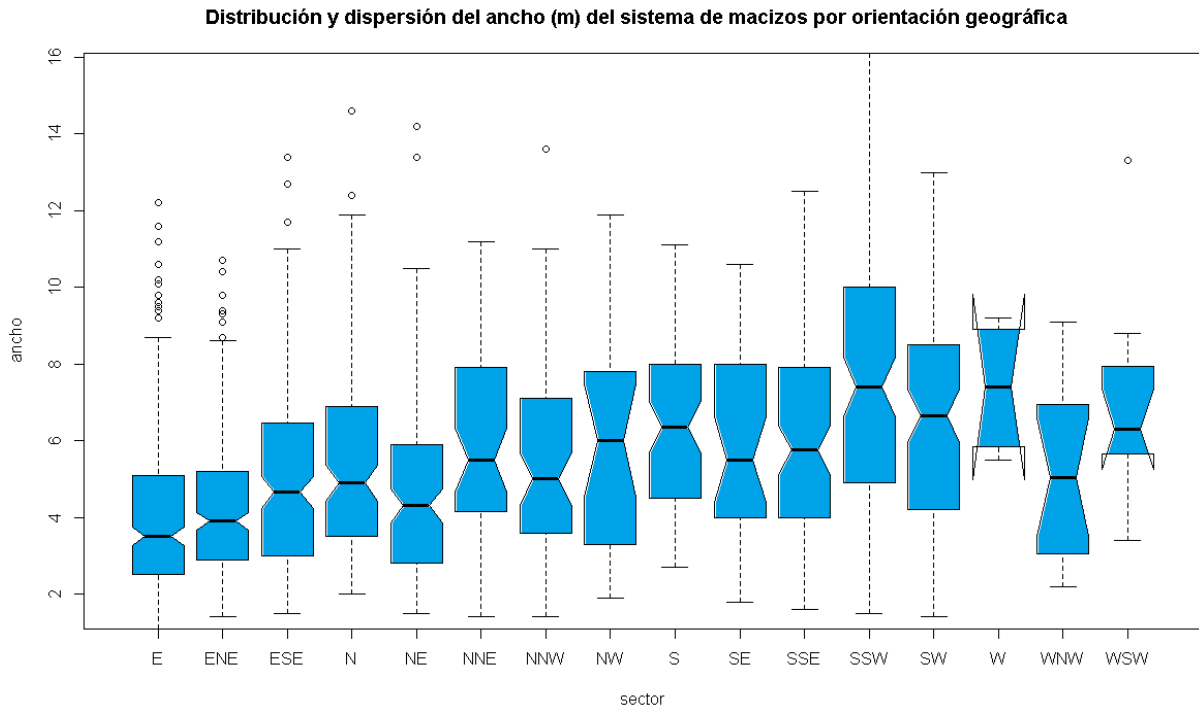


Figura 28. Boxplot del ancho (m) del sistema de macizos por orientación geográfica.

La representación boxplot del ancho del sistema de macizos muestra una distribución y dispersión muy similar al boxplot del área. Todos los sectores repiten una dispersión y sesgo del ancho muy variable, incluso la presencia de outliers en la mitad de los sectores se repite. El notch también se sobrelapa dentro de cada una de las orientaciones generales Norte (N-NW) y Oeste (W-WSW), indicando que las medianas no son significativamente diferentes con un α del 5%; Sin embargo, en este parámetro morfométrico no es solo la orientación Este la que en el ESE no se sobrelapa con los restantes sectores que componen ésta orientación general, si no que en el Sur, el notch del SSW no se sobrelapa con el SSE y SE.

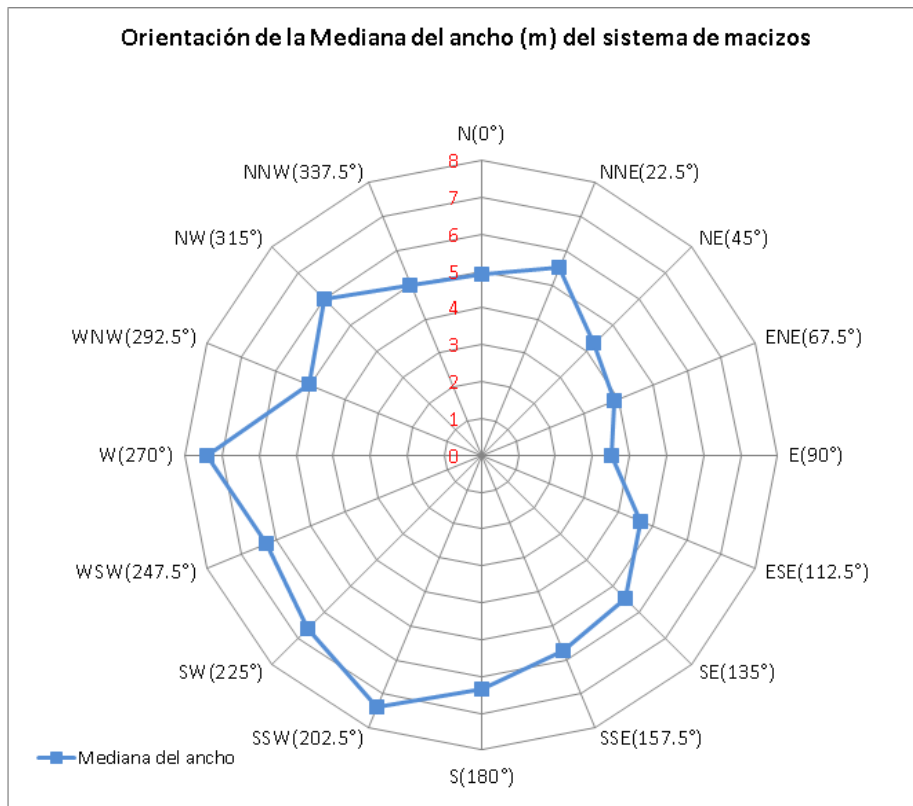


Figura 29. Orientación radial de la mediana del ancho del sistema de macizos en el atolón Puka puka.

La mediana del ancho del sistema de macizos presenta una tendencia a aumentar a lo largo de toda la orientación Oeste (WNW-WSW) y Sur (SW-SE). La mayor parte del Norte (NW-NNE) se mantiene entre 5 y 6 m; mientras que el NE y todo el Este (ENE-ESE) presentan una tendencia de disminución.

3.3 COMPARACIÓN DE LOS PATRONES MORFOMÉTRICOS

Mediante la comparación de los tres parámetros morfométricos de frecuencia, área y ancho de macizos (anexo 4, tabla 11); los dos últimos en función de la mediana, se puede observar un patrón; ya que al aumentar la frecuencia, tanto el área como el ancho disminuyen, siendo muy claro en el sector Norte y Este; sucediendo lo contrario en el sector Oeste y Sur donde el área y ancho aumentan mientras la frecuencia disminuye (fig. 30).

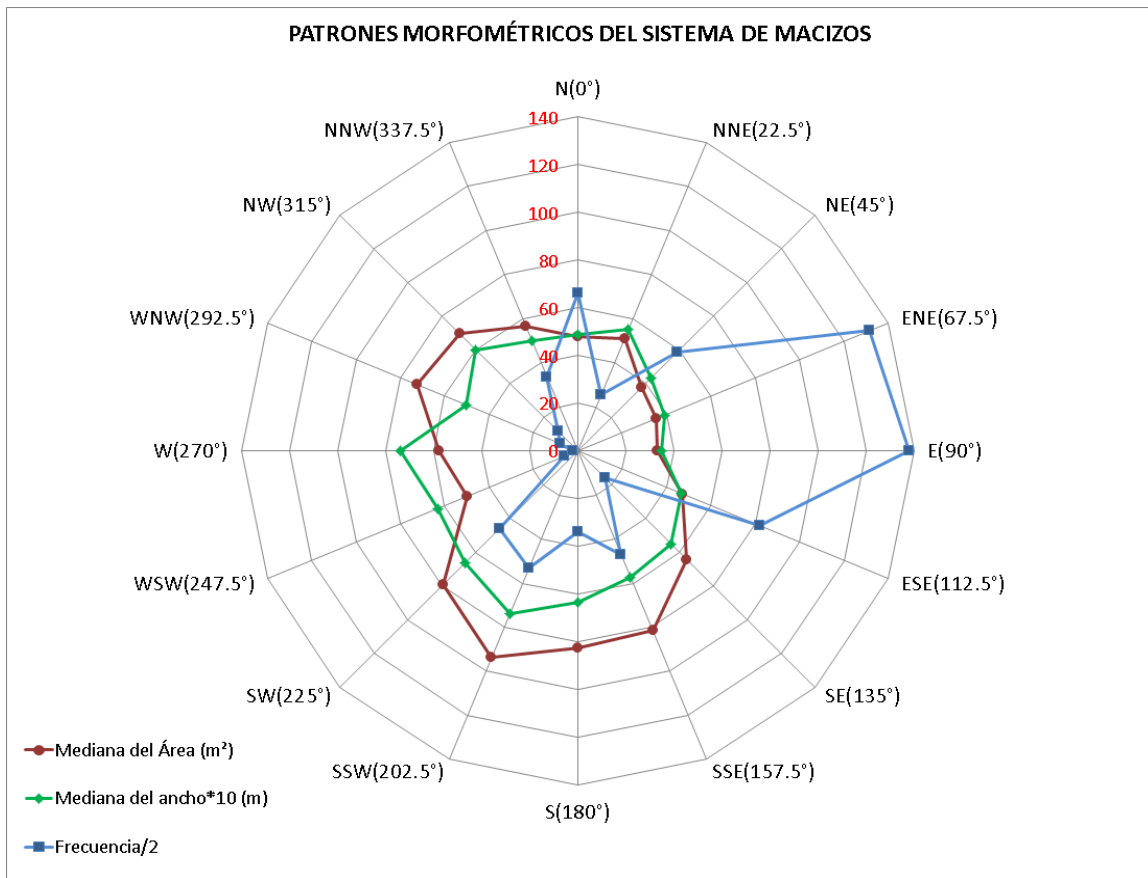


Figura 30. Orientación radial de la frecuencia, mediana del área, mediana del ancho del sistema de macizos en el Atolón Puka puka. Los datos de mediana del ancho (x10) y frecuencia (F/2) fueron libremente transformados con la finalidad de poder comparar las escalas.

3.4 PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS POR CARA DEL ARRECIFE

Los parámetros morfométricos de área, ancho y orientación para las caras A, B, C, D y E (fig.31) del perímetro arrecifal del atolón Puka puka se presentan en las figuras 32-37.

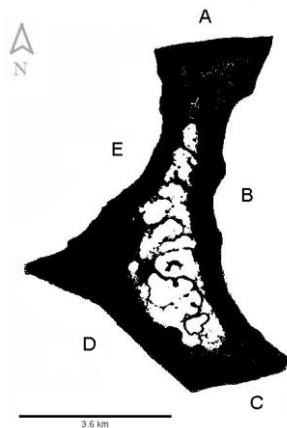


Figura 31. Cinco caras del arrecife frontal del atolón Puka puka.

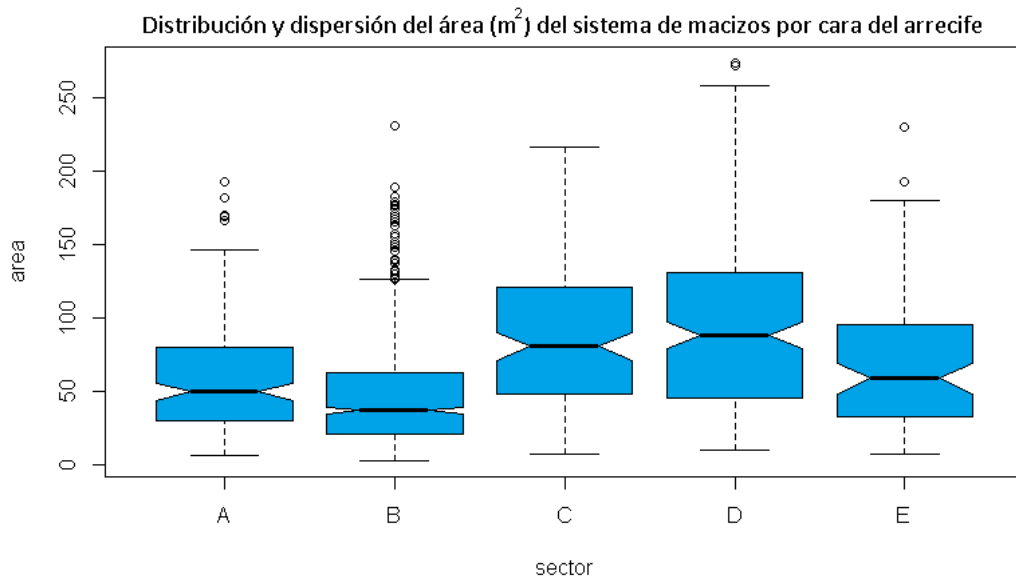


Figura 32. Boxplot del área (m^2) del sistema de macizos por cara del arrecife.

La representación boxplot del área del sistema de macizos por cara del arrecife muestra un solapamiento en el notch en las caras A y E, así como en las caras C y D; a excepción de la cara B la cual no se solapa con ninguna otra. La dispersión del área en las caras con solapamiento en el intervalo de confianza de las medianas también es similar.

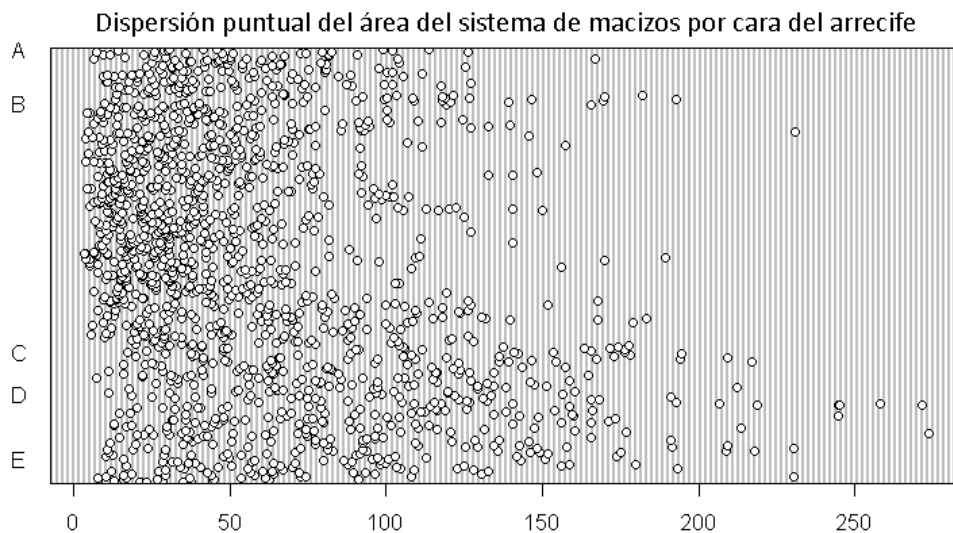


Figura 33. Dotchart del área (m^2) del sistema de macizos por cara del arrecife.

El gráfico dotchart del área del sistema de macizos por cara del arrecife permite ver las variaciones del área de forma simple; ya que cada punto representa un macizo y la dispersión total del sistema por cara del arrecife se hace evidente; siendo menos dispersa en la cara B.

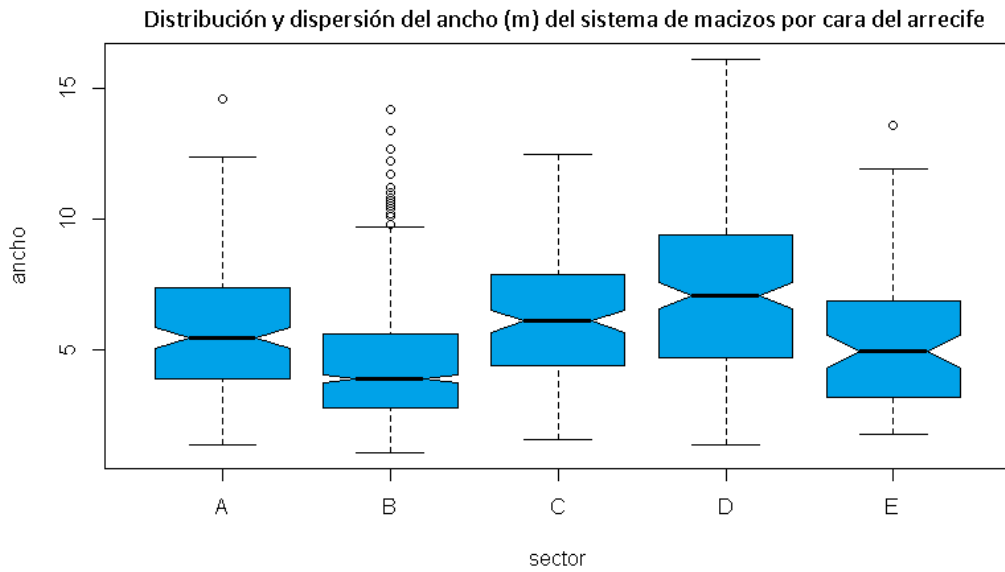


Figura 34. Boxplot del ancho (m) del sistema de macizos por cara del arrecife.

La representación boxplot del ancho del sistema de macizos por cara del arrecife muestra al igual que la representación del área, un sobrelape del notch en la cara A y E, y la ausencia de sobrelape en la cara B; sin embargo, la cara C y D en este caso no se sobrelapan. La dispersión y sesgo de las caras A y E es similar.

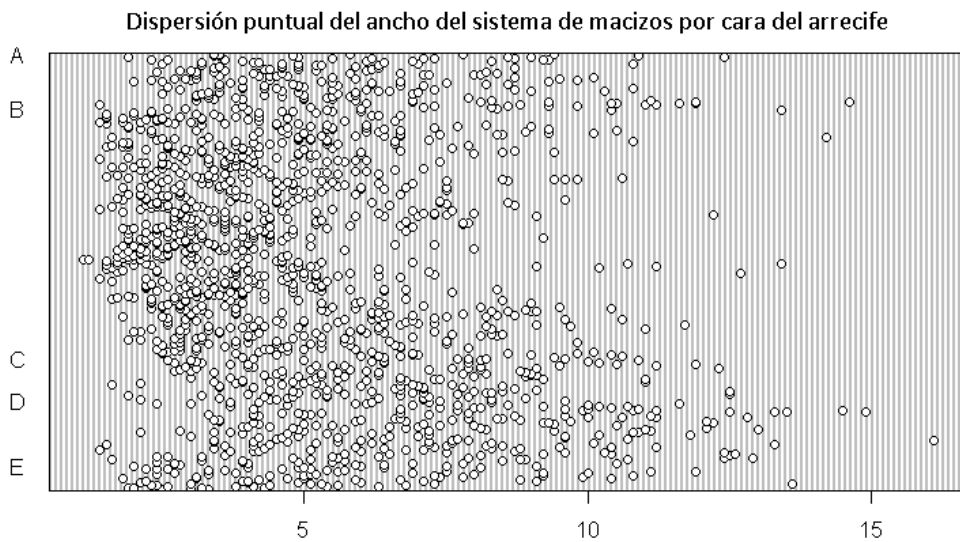


Figura 35. Dotchart del ancho (m) del sistema de macizos por cara del arrecife.

La dispersión total del ancho del sistema de macizos por cara del arrecife en el grafico dotchart donde cada punto representa un macizo, muestra las variaciones de este parámetro. El ancho del sistema de macizos en la cara B tiende a ser menos disperso que en las demás.

Distribución y dispersión de la orientación (grados) del sistema de macizos por cara del arrecife

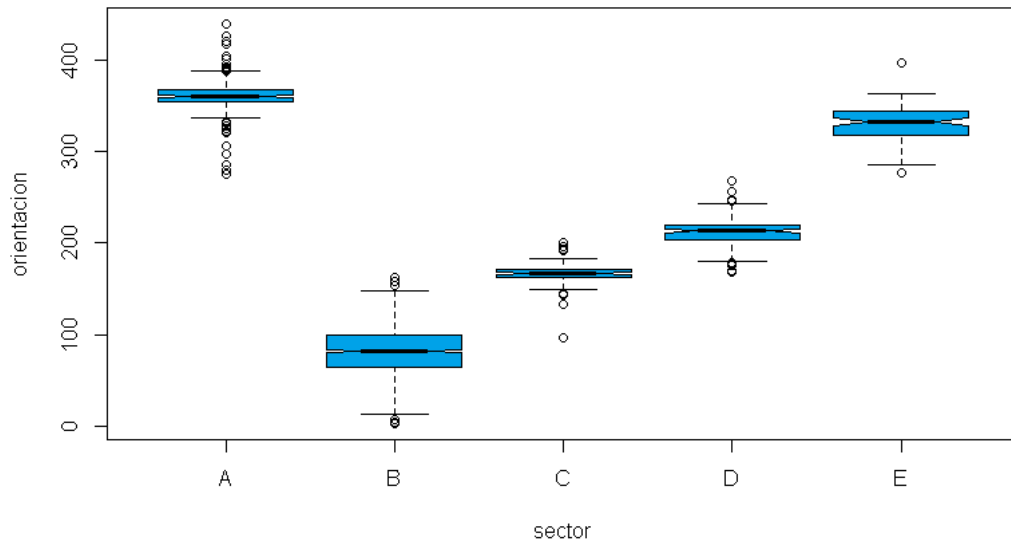


Figura 36. Boxplot de la orientación (grados) del sistema de macizos por cara del arrecife.

La representación boxplot de la orientación del sistema de macizos por cara del arrecife muestra un inexistente sobrelape en la medida de la desviación del rango intercuartil en las caras arrecifales, así como una menor dispersión y sesgo en todas las caras arrecifales.

Dispersión puntual de la orientación del sistema de macizos por cara del arrecife

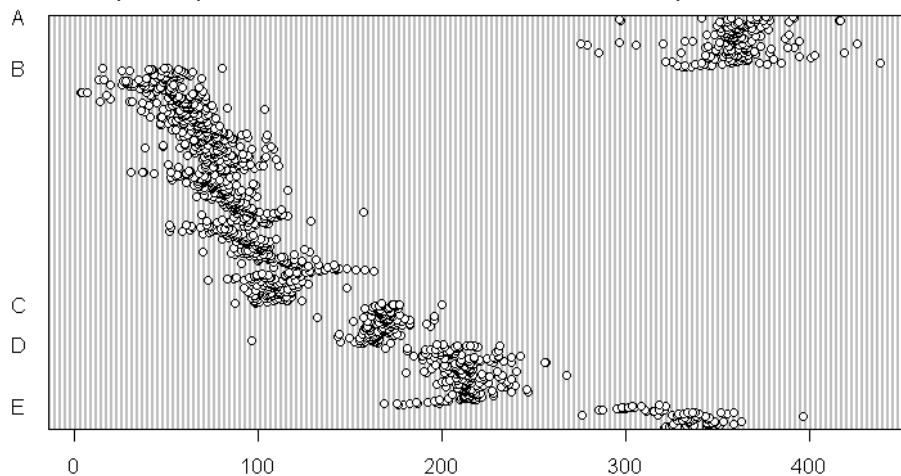


Figura 37. Dotchart de la orientación (grados) del sistema de macizos por cara del arrecife.

La dispersión de la orientación del sistema de macizos por cara del arrecife se encuentra muy agrupada; y en el caso de la cara A y E existen macizos que comparten la misma orientación.

3.5 ANÁLISIS KRUSKAL-WALLIS DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS POR CARA DEL ARRECIFE.

La prueba Kruskal-Wallis de los parámetros morfométricos de área, ancho y orientación de macizos por cara del arrecife del atolón Puka puka, realizada en la plataforma R, se presenta a continuación (Tabla 5):

Tabla 5. Resultados de la prueba Kruskal-Wallis del área, ancho y orientación de macizos por cara del arrecife del atolón Puka puka. Con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$), se comprueba que existen diferencias significativas en los parámetros morfométricos de los macizos en función de la cara del arrecife.

<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Kruskal-wallis rank sum test</td> </tr> <tr> <td>data: area by sector</td> </tr> <tr> <td>Kruskal-wallis chi-squared = 222.2379</td> </tr> <tr> <td>df = 4</td> </tr> <tr> <td>p-value < 2.2e-16</td> </tr> </tbody> </table>	Kruskal-wallis rank sum test	data: area by sector	Kruskal-wallis chi-squared = 222.2379	df = 4	p-value < 2.2e-16	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Kruskal-wallis rank sum test</td> </tr> <tr> <td>data: ancho by sector</td> </tr> <tr> <td>Kruskal-wallis chi-squared = 226.9399</td> </tr> <tr> <td>df = 4</td> </tr> <tr> <td>p-value < 2.2e-16</td> </tr> </tbody> </table>	Kruskal-wallis rank sum test	data: ancho by sector	Kruskal-wallis chi-squared = 226.9399	df = 4	p-value < 2.2e-16	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Kruskal-wallis rank sum test</td> </tr> <tr> <td>data: orient by sector</td> </tr> <tr> <td>Kruskal-wallis chi-squared = 1214.999</td> </tr> <tr> <td>df = 4</td> </tr> <tr> <td>p-value < 2.2e-16</td> </tr> </tbody> </table>	Kruskal-wallis rank sum test	data: orient by sector	Kruskal-wallis chi-squared = 1214.999	df = 4	p-value < 2.2e-16
Kruskal-wallis rank sum test																	
data: area by sector																	
Kruskal-wallis chi-squared = 222.2379																	
df = 4																	
p-value < 2.2e-16																	
Kruskal-wallis rank sum test																	
data: ancho by sector																	
Kruskal-wallis chi-squared = 226.9399																	
df = 4																	
p-value < 2.2e-16																	
Kruskal-wallis rank sum test																	
data: orient by sector																	
Kruskal-wallis chi-squared = 1214.999																	
df = 4																	
p-value < 2.2e-16																	

En los tres casos: área, ancho y orientación por cara del arrecife, el valor obtenido de p (p-value) el cual da la significancia estadística con un $\alpha=0.05$ establece que basadas en la mediana, cuando menos una de las distribuciones es diferente de cuando menos una de las otras distribuciones. Lo que significa que existe una relación significativa entre los parámetros morfométricos y la cara del arrecife.

El estadístico H es el valor de Ji Cuadrada (Kruskal-Wallis Chi-squared, en la tabla 5) que para los tres casos es mayor o igual al valor crítico de ji cuadrada, ya que el valor de p es menor a 0.05, por lo cual la ji cuadrada obtenida se encuentra dentro de la región crítica del valor α y con ello se rechaza la H_0 sobre la no diferencia de medianas por cara del arrecife.

3.6 COMPARACIÓN MULTIPLE POST-HOC DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS POR CARA DEL ARRECIFE CON LA PRUEBA KRUSKAL-WALLIS.

Si bien la prueba Kruskal-Wallis valora estadísticamente si las diferencias de las medianas de los parámetros morfométricos en función de la cara del arrecife son significativas o no, carece de información acerca de cuáles medianas específicamente son diferentes. Por lo que, para averiguar que medianas difieren de cuales otras y saber qué factores (caras) son las responsables del rechazo de la hipótesis nula, se muestran a continuación los resultados de la comparación múltiple a posteriori por medio de la prueba Kruskal-Wallis (Tabla 6-8).

Tabla 6. Resultados de la comparación múltiple a posteriori de Kruskal-Wallis para el área de macizos por cara del arrecife del atolón Puka puka. Con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$), se establece que las medianas de las dos parejas de factores representadas por las caras A-E y C-D no difieren significativamente en relación con el área de macizos en función de la cara del arrecife.

kruskalmc(area ~ sector, data=f0)			
Multiple comparison test after Kruskal-Wallis			
p.value: 0.05			
Comparisons			
	obs.dif	critical.dif	difference
A-B	148.17096	98.88847	TRUE
A-C	241.15443	134.87411	TRUE
A-D	259.83289	121.75176	TRUE
A-E	66.24988	160.07843	FALSE
B-C	389.32539	109.01432	TRUE
B-D	408.00385	92.28537	TRUE
B-E	214.42083	138.98994	TRUE
C-D	18.67845	130.11027	FALSE
C-E	174.90456	166.52416	TRUE
D-E	193.58301	156.08576	TRUE

No existe diferencia significativa del área del sistema de macizos en las caras A-E y C-D; mientras que las restantes ocho parejas de factores son las responsables del rechazo de la no diferencia de medianas por cara arrecifal. La dispersión del área del sistema de macizos se observa en la figura 38.

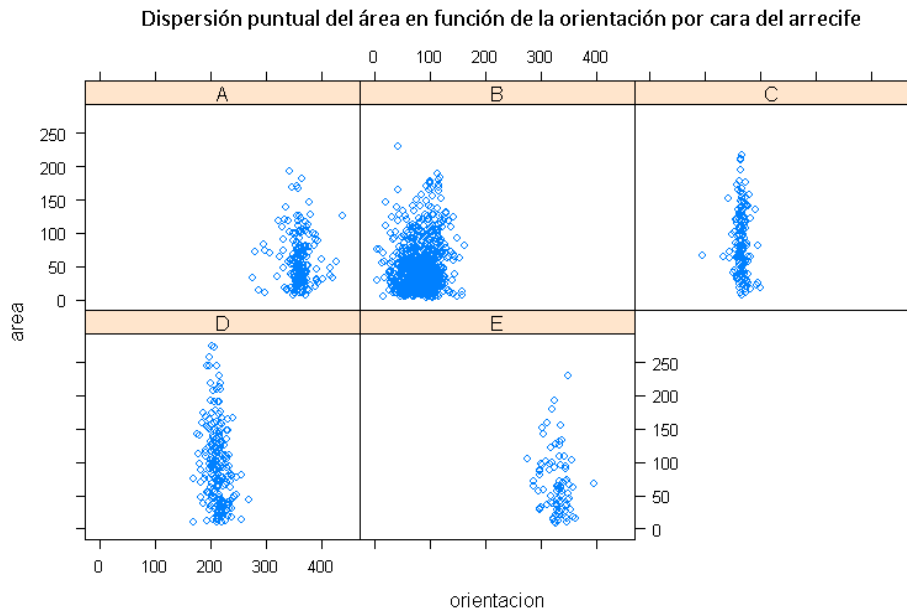


Figura 38. Dispersión del área del sistema de macizos con base en la orientación por cara del arrecife.

Mediante la observación individual de la dispersión puntual del área de macizos por cara del arrecife es más clara la similitud en la distribución de las de caras A-E y D-C, tal como lo corrobora la comparación múltiple post-hoc de Kruskal-Wallis.

Tabla 7. Resultados de la comparación múltiple a posteriori de Kruskal-Wallis para el ancho de macizos por cara del arrecife del atolón Puka puka. Con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$), se establece que las medianas de las tres parejas de factores representadas por las caras A-C, A-E y C-D no difieren significativamente en relación con el ancho de macizos en función de la cara del arrecife.

kruskalmc(ancho ~ sector, data=f0)			
Multiple comparison test after Kruskal-wallis			
p.value: 0.05			
Comparisons			
	obs.dif	critical.dif	difference
A-B	257.41038	98.88847	TRUE
A-C	75.08077	134.87411	FALSE
A-D	169.67325	121.75176	TRUE
A-E	109.17918	160.07843	FALSE
B-C	332.49115	109.01432	TRUE
B-D	427.08363	92.28537	TRUE
B-E	148.23120	138.98994	TRUE
C-D	94.59249	130.11027	FALSE
C-E	184.25995	166.52416	TRUE
D-E	278.85244	156.08576	TRUE

Al igual que en el caso del área, no existe diferencia significativa del ancho del sistema de macizos en las caras A-E y C-D, pero además tampoco para el par A-C. Las restantes siete parejas de factores avalan el rechazo de la no diferencia de medianas por cara arrecifal. La dispersión del ancho del sistema de macizos se observa en la figura 39.

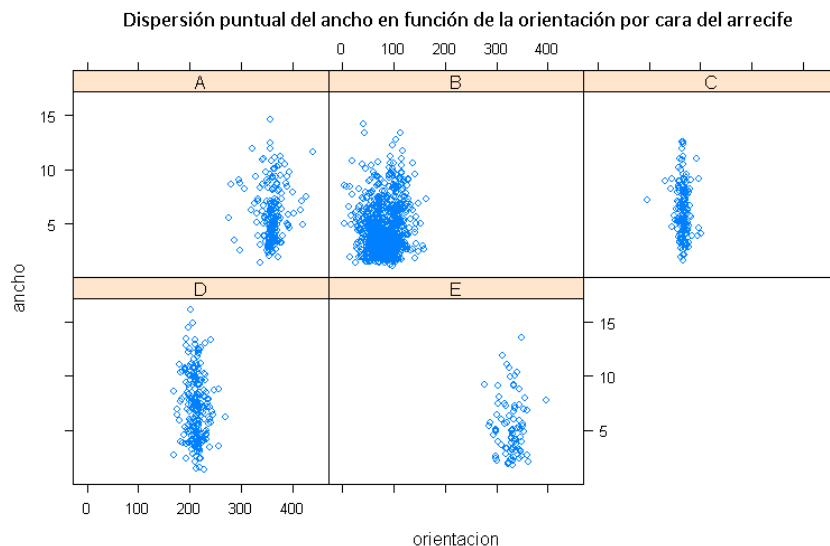


Figura 39. Dispersión del ancho del sistema de macizos con base en la orientación por cara del arrecife.

Con la observación individual de la dispersión puntual del ancho de macizos por cara del arrecife es notoria la similitud en la distribución de las de caras A-E y D-C, tal como lo corrobora la comparación múltiple post-hoc de Kruskal-Wallis; sin embargo dicha prueba marca también la no diferencia entre las caras A-C, la cual no es tan clara en la distribución puntual, ya que no se percibe ningún solapamiento.

Tabla 8. Resultados de la comparación múltiple a posteriori de Kruskal-Wallis para la orientación de macizos por cara del arrecife del atolón Puka puka. Con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$), se establece que las medianas de la pareja de factores representada por las caras A-E no difieren significativamente en relación con la orientación de macizos en función de la cara del arrecife.

kruskalmc(orientacion ~ sector, data=f0)		
Multiple comparison test after kruskal-wallis		
p.value: 0.05		
Comparisons		
	obs.dif	critical.dif
A-B	977.9615	98.88847
A-C	468.9683	134.87411
A-D	283.6086	121.75176
A-E	107.9358	160.07843
B-C	508.9932	109.01432
B-D	694.3529	92.28537
B-E	870.0257	138.98994
C-D	185.3597	130.11027
C-E	361.0325	166.52416
D-E	175.6728	156.08576

Para el caso de la orientación del sistema de macizos por cara del arrecife, no existe diferencia significativa en las caras A y E; a diferencia de los 9 pares de caras restantes, los cuales avalan el rechazo de la H_0 . La dispersión de la orientación del sistema de macizos se observa en la figura 40.

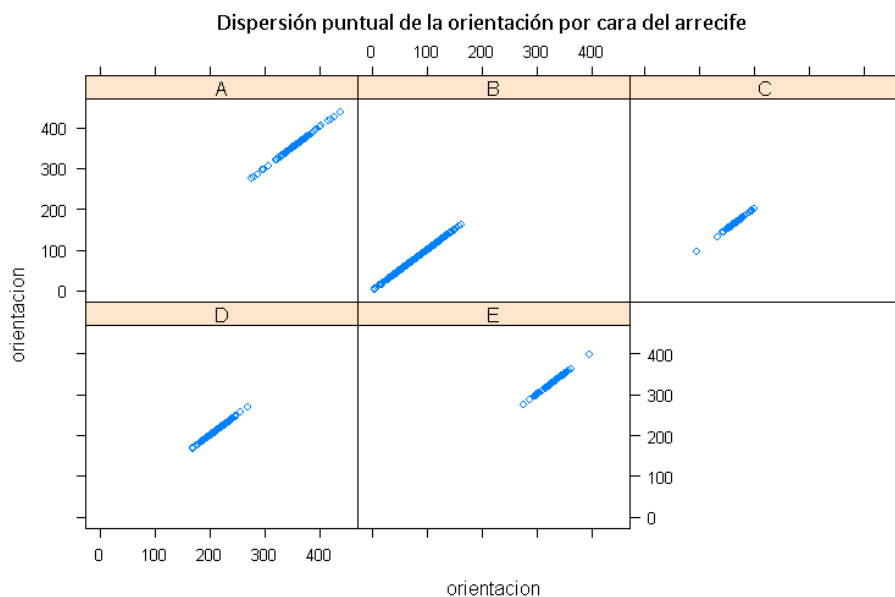


Figura 40. Dispersión de la orientación del sistema de macizos por cara del arrecife.

Mediante la observación individual de la dispersión puntual de la orientación de macizos por cara del arrecife es clara la similitud en la distribución de las de caras A-E, tal como lo corrobora la comparación múltiple post-hoc de Kruskal-Wallis.

3.7 DISPERSIÓN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS POR CARAS FUSIONADAS.

Después de los resultados de la comparación múltiple *post hoc* de Kruskal-Wallis se presenta la fusión de las caras arrecifales en donde la H_0 no pudo ser rechazada. Dando como resultado de la fusión un total de tres sectores (figuras 41-46), donde:

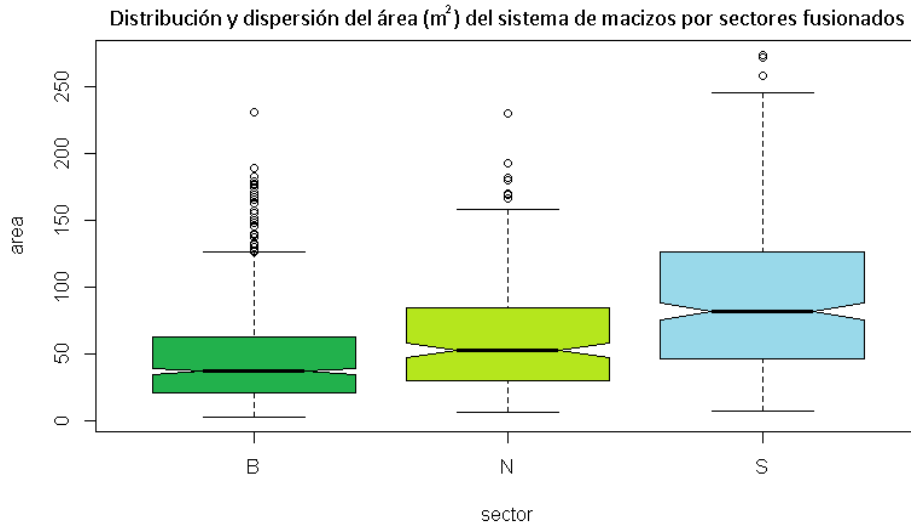
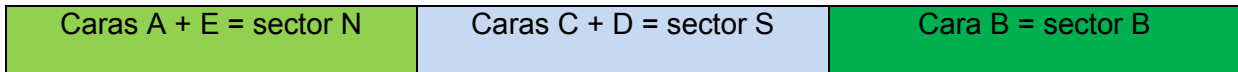


Figura 41. Boxplot del área (m^2) del sistema de macizos por sector del arrecife.

El boxplot del área del sistema de macizos por sector del arrecife muestra una ausencia de sobrelape en la medida de la desviación del rango intercuartil, indicando que las medianas del área del sistema de macizos por sector son significativamente diferentes.

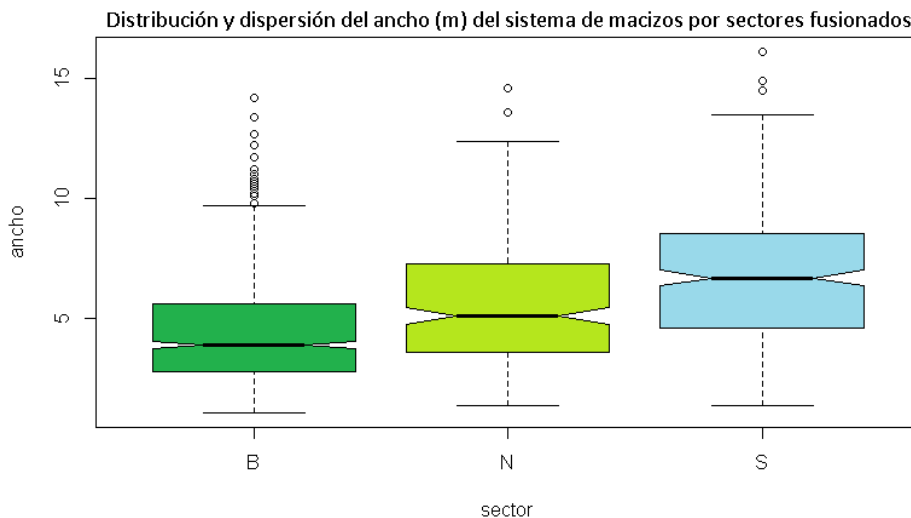


Figura 42. Boxplot del ancho (m) del sistema de macizos por sector del arrecife.

El boxplot del ancho del sistema de macizos por sector del arrecife muestra al igual que el área, una ausencia de sobrelape en el notch, indicando que las medianas del ancho del sistema de macizos por sector son significativamente diferentes.

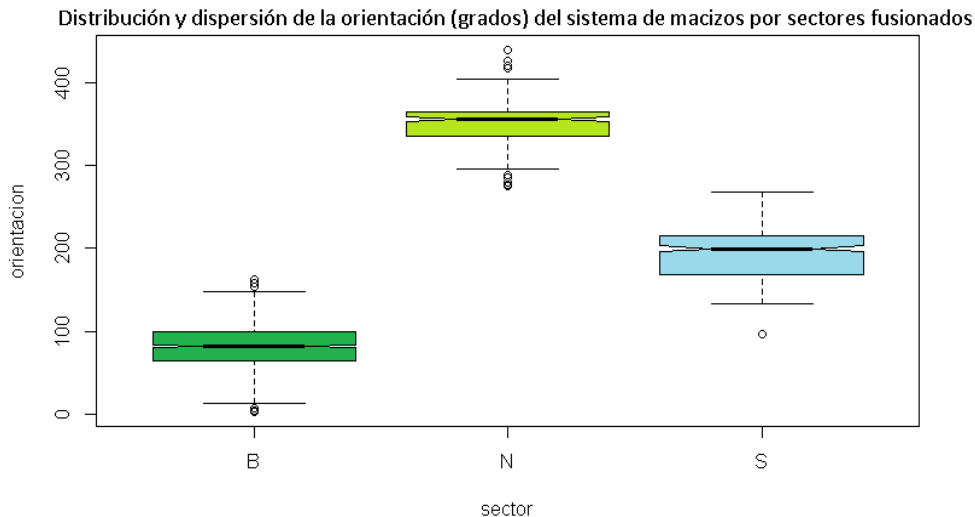


Figura 43. Boxplot de la orientación (grados) del sistema de macizos por sector del arrecife.

El boxplot de la orientación del sistema de macizos por sector del arrecife muestra al igual que el área y el ancho, una clara ausencia de sobrelape en el notch.

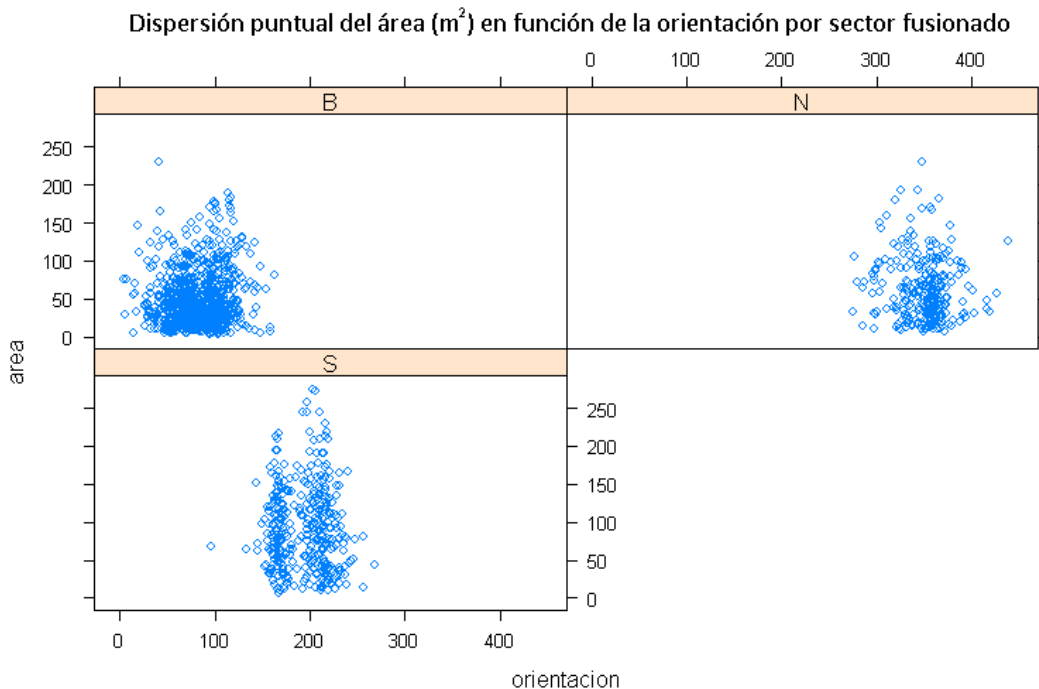


Figura 44. Dispersión del área del sistema de macizos con base en la orientación por sector del arrecife.

Mediante la observación individual de la dispersión puntual del área de macizos por sector del arrecife es evidente la distribución que da sustento a las caras fusionadas; es decir, el sector N muestra una clara agrupación respecto al área, así como el sector S, en donde se distinguen la cara C (izquierda) y D (derecha) que al tener una dispersión tan similar pueden considerarse significativamente como una sola.

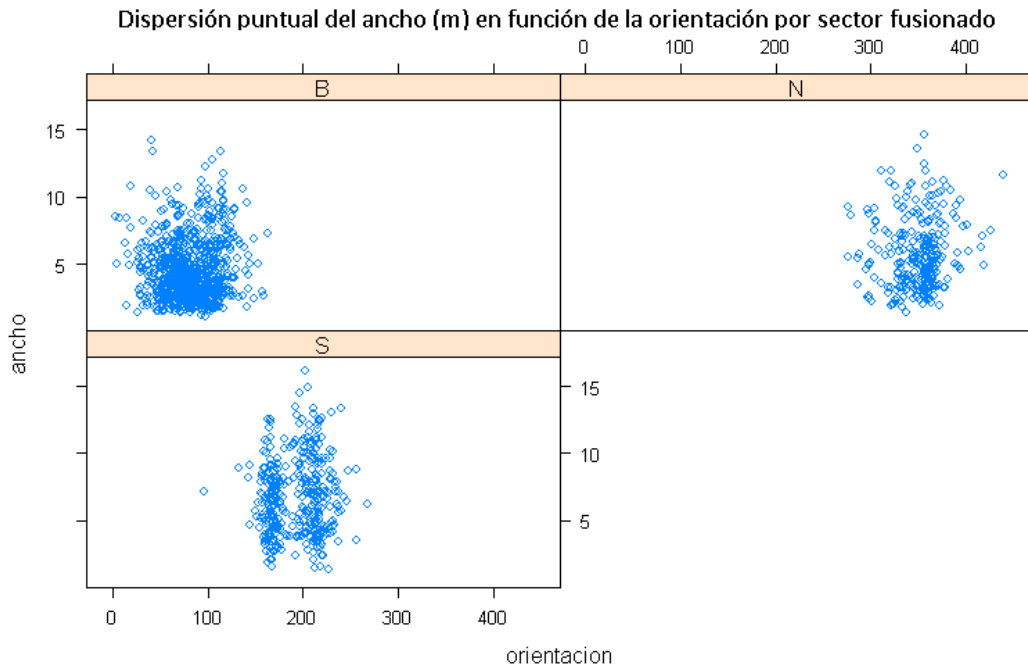


Figura 45. Dispersión del ancho del sistema de macizos con base en la orientación por sector del arrecife.

Al igual que con el área, la observación individual de la dispersión puntual del ancho de macizos por sector del arrecife muestra una distribución que da sustento a la fusión de caras arrecifales. El sector N muestra una distribución notoriamente agrupada respecto al ancho, mientras que en el sector S se distinguen la cara C (izquierda) y D (derecha) que al tener una dispersión tan parecida pueden considerarse significativamente como una sola.

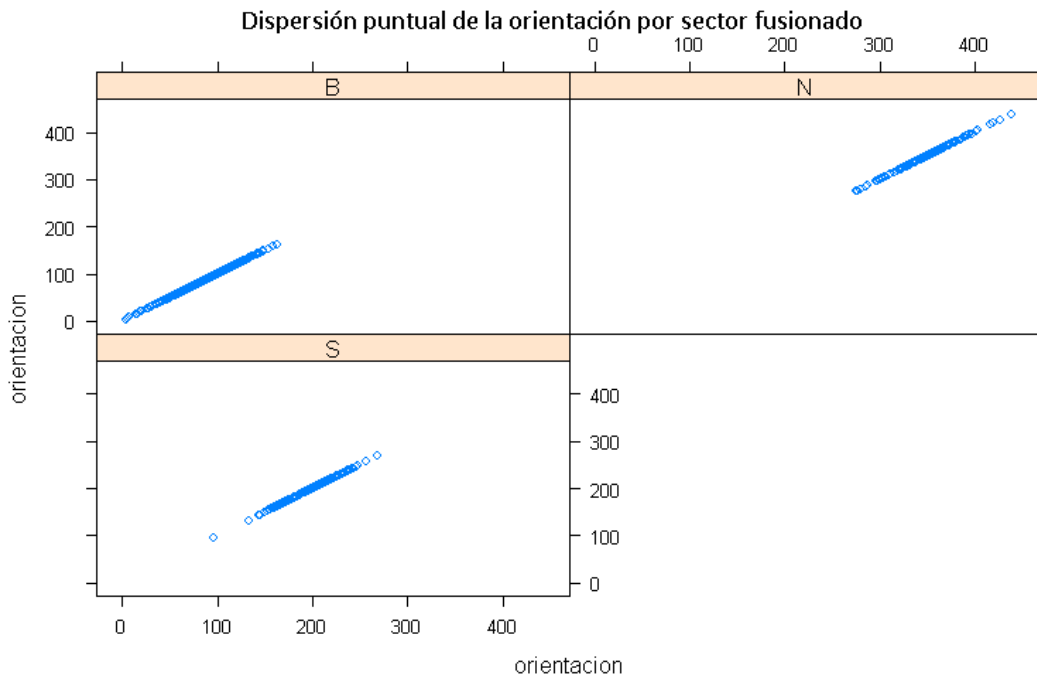


Figura 46. Dispersión de la orientación del sistema de macizos por sector del arrecife.

La dispersión puntual de la orientación de macizos por sector del arrecife muestra una distribución que da sustento a la fusión de caras; en donde cada sector muestra una distribución notoriamente agrupada respecto a la orientación.

3.8 RELACIÓN DE LOS SECTORES CON CLIMA DE OLEAJE

De acuerdo con las diferencias morfométricas del sistema de macizos por sector del arrecife en el atolón Puka puka, se propone que éstas pueden estar relacionadas con la exposición al clima de oleaje, el cual de acuerdo con las condiciones reportadas por Young (1999) posee las siguientes características de oleaje dominante sobre el atolón Puka puka (fig. 47):

El swell del Pacífico Norte que incide de 0 a 45° de orientación sobre el sector N, ocurre durante Diciembre-Abril, con una altura del oleaje significativo promedio de 3 m, un periodo de oleaje promedio de 8 a 12 s; sin la presencia de viento local.

El swell del Este que incide más allá de los 45° extendiéndose hasta cerca de los 110° de orientación que incide sobre el sector B, ocurre durante Noviembre-Marzo, con una altura del oleaje significativo promedio de 2 m y un periodo de oleaje promedio de 9 a 12 s. Se presenta viento local del Este que incide desde los 45° hasta los 90° durante todo el año, con una velocidad promedio de 5 a 7 m/s.

Finalmente, el swell del Pacífico Sur que incide de 180 a 210° de orientación sobre el sector S, ocurre durante Abril-Noviembre, con una altura del oleaje significativo

promedio de 2.5 a 3.3 m, un periodo de oleaje promedio de 9 a 13 s. sin la presencia de viento local.

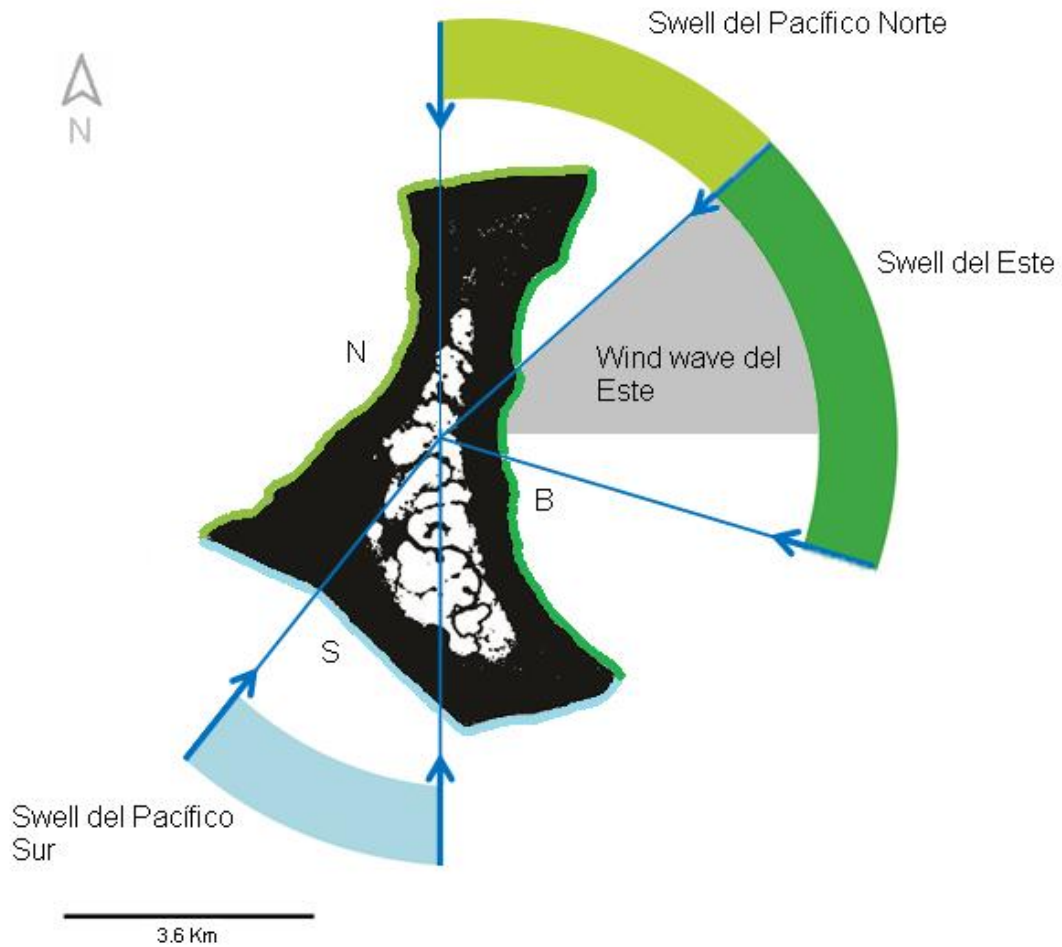


Figura 47. Relación de los sectores del sistema de macizos con el clima de oleaje sobre el atolón Puka puka.

4 DISCUSIÓN

Los sistemas de macizos se orientan de forma ortogonal a la entrada del oleaje (Gischler, 2010; Shinn, 2011) lo que pone en evidencia los lugares sobre los cuales las olas influyen directamente. La distribución de los sistemas de macizos puede correlacionarse con la distribución direccional de la fuerza del oleaje, y revelar tanto un máximo de exposición (Munk y Sargent, 1954) como un mínimo, por su menor definición, regularidad o ausencia en ambientes menos expuestos (Duce *et al.*, 2014). Por lo que, con base en la distribución por orientación geográfica de los parámetros morfométricos del sistema de macizos del Atolón Puka puka se observa un patrón para cada parámetro.

Frecuencia de macizos:

El espaciado de los sistemas de macizos parece actuar de forma inversamente proporcional a la energía del oleaje (Stolarzzi *et al.*, 2013), y por ello puede correlacionarse con la fuerza de este último (Munk y Sargent, 1954). Una mayor frecuencia en los macizos da por resultado una menor separación o espaciado entre estos, por lo que, a mayor frecuencia mayor es la energía y fuerza del oleaje; y viceversa. Por lo tanto, se sugiere que debido a la frecuencia del sistema de macizos en el Este, Norte y SSW se presenta de forma descendente una mayor energía y fuerza del oleaje.

Área de macizos:

El área del sistema de macizos muestra una respuesta inversa a la frecuencia de macizos, sobre todo en la orientación geográfica Este, en donde al aumentar la frecuencia el área disminuye. En el WNW, SSW, NNE y SE donde la frecuencia disminuye o es menor, el área de macizos tiende a aumentar.

Ancho de macizos:

El ancho de macizos muestra un patrón muy similar al del área; por lo que, con respecto a la frecuencia su patrón también es inverso, ya que a mayor frecuencia de macizos, menor es el ancho que presentan.

Este análisis, sugiere que aparentemente la frecuencia responde de forma inversa al área y al ancho de macizos; por lo que quizá, a mayor área o ancho, menor es la energía y fuerza del oleaje; y viceversa. Condición que coincide con lo reportado por Stolarzzi *et al.* (2003), quienes argumentan que los sistemas de macizos son relativamente más estrechos en profundidades someras, contrariamente a lo que sucede en aguas profundas; en otras palabras, en aguas someras la energía del oleaje es mucho mayor por lo que el área y/o ancho de los macizos tiende a ser

menor, mientras que en aguas profundas la energía del oleaje disminuye y propicia mayores dimensiones en los macizos; lo que probablemente ocasione una menor frecuencia.

En este estudio, la distribución y los patrones encontrados del sistema de macizos sugieren que sobre el Atolón Puka puka existe una exposición diferencial al oleaje de acuerdo con la orientación geográfica de las caras del arrecife frontal, la cual posiblemente está relacionada con distintas regiones generadoras de oleaje, en donde el swell y/o el oleaje de viento en forma de viento local sean los responsables del clima de oleaje.

Por lo que, con base en la prueba de Kruskal-Wallis y la posterior comparación múltiple se exponen las siguientes relaciones significativas encontradas entre los parámetros morfométricos y las caras del arrecife frontal del sistema de macizos:

Tanto las caras A-E, como C-D no son significativamente diferentes respecto al área y ancho del sistema de macizos, además la pareja A-E tampoco presenta diferencia significativa respecto a la orientación; por lo tanto, ambos pares de caras parecen estar expuestos a las mismas condiciones de oleaje. En el caso del par A-E los macizos no muestran diferencia en orientación, a diferencia del sistema de macizos del par C-D.

Si bien, las caras A-C se presentan en orientaciones radicalmente diferentes, estas no presentan una diferencia significativa respecto al ancho del sistema de macizos, lo que puede sugerir la existencia de un componente en el oleaje incidente que sea similar y ocasione ésta respuesta.

Por lo tanto, debido a la inexistencia de diferencia significativa con respecto a la mayoría de los parámetros morfométricos en las caras A-E y C-D se propone la fusión de estas, dando por resultado la división del arrecife frontal del atolón Puka puka en tres sectores: N, B y S (figuras 41-46) de acuerdo con la relación significativa de su morfometría. Dando origen al establecimiento de una potencial relación de los sectores con el clima de oleaje incidente (figura 47).

El sector N, está asociado con la exposición al oleaje proveniente del swell del Pacífico Norte, originado en latitudes altas, durante casi la mitad del año, con valores promedio de altura significativa y periodo de ~3 m y 8-12 s; respectivamente; con la ausencia de viento local.

El sector B, siendo el único que no resultara de la fusión de caras arrecifales, está asociado con dos tipos de oleaje. Por un lado, con el swell del Este que incide sobre

el arrecife durante casi la mitad del año, con valores promedio de altura significativa y periodo de 2 m y 9-12 s; respectivamente. Y por el otro, con el oleaje de viento generado por el viento local del Este que incide todo el año con una velocidad promedio de 5 a 7 m/s. En este sector, los dos tipos de oleaje actúan en sinergia creando aparentemente una retroalimentación positiva que refleja una respuesta en el sistema de macizos de una mayor frecuencia pero menor área y ancho.

El sector S, se asocia con la exposición al oleaje proveniente del swell del Pacífico Sur, que ocurre sobre el arrecife durante dos tercios del año, con valores promedio de altura significativa y periodo de 2.5-3.3 m y 9-13 s; respectivamente, sin viento local. Condiciones que posiblemente son las causantes de generar la respuesta en el sistema de macizos de una mayor área y ancho contra una menor frecuencia.

5 CONCLUSIONES

Actualmente se cree que el conocimiento de la formación y desarrollo de los sistemas de macizos como respuesta ante factores físicos es muy pobre. Este estudio representa el primero en su tipo, desarrollado a partir de software libre e información disponible mundialmente. Por lo que se ha beneficiado de la disponibilidad de imágenes de distinta temporalidad, y mediciones que proporcionan un cálculo válido para las características y alcances de los objetivos propuestos. Sin embargo, durante el muestreo ciertas limitaciones con las imágenes de GE tuvieron que ser permitidas, ya que el error de posición y de escala son intrínsecos a éste software; mientras que, tanto el analizador de imágenes ImageJ que posee un enorme potencial de análisis y prospección, como la plataforma R con poderoso potencial de análisis estadístico, requieren de conocimientos técnicos y prácticos para poder operarlos.

Con la metodología propuesta se cuantificaron los parámetros morfométricos del sistema de macizos del arrecife frontal del atolón Puka puka, perteneciente a las islas Cook de Nueva Zelanda. Se calculó el área, ancho y orientación de 1517 macizos a partir del procesamiento de 247 segmentos en el perímetro arrecifal, de los cuales 163 contaron con al menos un macizo por segmento.

Con base en la distribución por orientación geográfica de los parámetros morfométricos por macizo, se propone que el patrón de la frecuencia responde de forma inversa al área y ancho de macizos. Además, aparentemente a mayor frecuencia, mayor es la energía y fuerza de oleaje, por lo que, lo contrario ocurre con una mayor área o ancho en el sistema de macizos.

Se sugiere que por la distribución y los patrones encontrados en el sistema de macizos existe una influencia diferencial del oleaje de acuerdo con la orientación del arrecife frontal posiblemente vinculada con distintos tipos de oleaje, ya sea swell y/o oleaje de viento.

Los resultados de la prueba Kruskal-Wallis sobre los parámetros morfométricos por cara del arrecife y la posterior comparación múltiple permitieron establecer no solo la relación entre las caras arrecifales y la determinación de cuáles condiciones en los parámetros diferían de las demás; si no que también, hicieron posible el reconocimiento de la influencia del clima de oleaje sobre sectores del arrecife, interpretados como tres regiones de influencia del oleaje proveniente de diferentes fuentes y direcciones.

Como consecuencia se sugieren distintos escenarios para cada sector identificado

del arrecife frontal en el atolón Puka puka.

Aparentemente, sobre el sector N la respuesta del sistema de macizos se origina por el mismo forzador del oleaje que da origen al swell del Pacífico Norte. En el sector S, al parecer el swell del Pacífico Sur que durante la mayor parte del año incide sobre el frente arrecifal, es el generador de una máxima magnitud en el área y ancho contra una mínima frecuencia de macizos. Si bien sobre ambos sectores el clima de oleaje proviene de procesos generados en distintos lugares, quizá la similitud en magnitud del oleaje incidente en forma de swell sea lo que provoque que respecto al ancho, parte del sector N no sea diferente a una parte del sector S.

En lo referente al sector B, se sugiere que tanto el swell como el oleaje de viento del Este producen una retroalimentación positiva que genera una máxima frecuencia contra una mínima magnitud en el área y ancho de macizos. Lo que significaría que ambas fuentes de oleaje propician un ambiente de mayor fuerza y energía que generan una respuesta morfométrica en el sistema de macizos de mayor frecuencia contra una menor área y ancho de macizos.

El análisis cuantitativo de la distribución morfométrica por orientación del sistema de macizos del arrecife frontal en Puka puka, posibilitó no solo la detección de patrones en los parámetros morfométricos de frecuencia, área y ancho, sino también permitió sugerir que la posible causa de la respuesta morfométrica en los sectores del sistema de macizos se debe al clima de oleaje proveniente de tres direcciones y fuentes distintas, ya sea en forma de swell, oleaje de viento o ambas.

Los alcances del presente estudio son potencialmente aplicables en otros arrecifes donde la disponibilidad de imágenes permita un análisis cuantitativo y además exista un registro del clima de oleaje incidente. La disponibilidad de imágenes y registro del clima de oleaje son dos condiciones que permitirían aplicar la metodología propuesta para ampliar el conocimiento en la respuesta del sistema de macizos y justificar o descartar la posibilidad de que estos sistemas puedan ser en un futuro interpretados como un proxy del clima de oleaje.

REFERENCIAS

- Andr foudt, ., ramer, P., Torres-Pulliza, D., Joyce, K.E., Hochberg, E.J., Garza-Pérez, R., Mumby, P.J., Riegl, B., Yamano, H., White, W.H., Zubia, M., Brock, J.C., Phinn, S.R., Naseer, A., Hatcher, B.G., y Muller-Karger, F.E. 2003. Multi-site evaluation of IKONOS data for classification of tropical coral reef environments. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 88. pp. 128-143.
- Blanchon, P. 2011. Geomorphic Zonation. In: Hopley, D. (Ed), *Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, form and process*. Springer-Verlag Earth Science Series. pp. 469-486.
- Butler, D. 2006. The web-wide World. *Nature*. Vol. 439. pp. 776-779.
- Cavaleri, L., Fox-Kemper, B. y Hemer, M. 2012. Wind waves in the coupled climate system. *Bulletin American Meteorology. Society*. Vol. 93. pp. 1651-1661.
- Chang, Y. A., Parrales, M.E., Jimenez, J., Sobieszczyk, M.E., Hammer, S.M., Copenhagen, D.J., y Kulkarni, R.P. 2009. Combining Goole Earth and GIS mapping technologies in a dengue surveillance system for developing countries. *International Journal of Health Geographics*. pp. 8-49.
- Chen, G., Chapron, B., Ezraty, R., y Vandemark, D. 2002. A Global View of Swell and Wind Sea Climate in the Ocean by Satellite Altimeter and Scatterometer. *American Meteorological Society*. Vol. 19. pp.1849-1859.
- Chorley, R.J. 1962. *Geomorphology and General Systems Theory*. Geological Survey Professional Paper 500-B. United States Government Printing Office, Washington. pp. B1-B10
- Chuvienco, E., S. 2000. *Fundamentos de Teledetección espacial*. Ediciones RIALP, S.A. Madrid.
- Cortese, G., Dolven, J. K., Bjørklund, K., R., y Malmgren, B.A. 2005. Late Pleistocene-Holocene radiolarian paleotemperatures in the Norwegian Sea Based on artificial neural networks. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Vol. 224. pp. 311-332.
- Couse, E., Ridgwell, A., y Hendy, E. J. 2012. Environmental controls on the global distribution of shallow-water coral reefs. *Journal of Biogeography*. Vol. 39. pp. 1508-1523.
- Duce, S., Vila-Cocejo, A., Hamylton, S., Bruce, E., y Webster, J. M. 2014. Spur and Groove distribution, morphology and relationship to relative wave exposure, Southern Great Barrier Reef, Australia. *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 70*. pp. 115-120.
- Elachi, C., y Van Zyl, J.J. 2006. *Introduction to Physics and techniques of Remote sensing*, 2nd Ed. John Wiley & Sons. 616 pp.

- Fagerstrom, J.A. 1987. The evolution of reef communities. Wiley Interscience, John Wiley and Sons, New York. 600 pp.
- Fan, Y., Ginis, I., y Hara, T. 2009. The effect of wind–wave–current interaction on air–sea momentum fluxes and ocean response in hurricanes. *Journal Physical Oceanography*. Vol. 39. pp. 1019-1034.
- Fan, Y., Lin, S.J., Griffies, S.M., y Hemer, M.A. 2013. Simulated Global Swell and Wind-Sea Climate and Their Responses to Anthropogenic Climate Change at the End of the Twenty-First Century. *Journal of Climate*. Vol. 27. pp. 3516-3536.
- Fisher, G. B., Amos, C.B., Bookhagen, B., Burbank, D.W., y Godard, V. 2012. Channel widths, Landslides, Faults, and beyond: The new world order of high-spatial resolution Google Earth imagery in the study of earth surface processes. *The Geological Society of America. Special Papers*. Vol. 492. pp. 1-22.
- Gerritsen, F. 1981. Wave Attenuation and Wave Set-up on a Coastal Reef. Look Lab. Tech. Report No. 48, University of Hawaii Sea Grant Program, University of Hawaii.
- Gischler, E. 2010. Indo-Pacific and Atlantic spurs and grooves revisited: the possible effects of different Holocene sea-level history, exposure, and reef accretion rate in the shallow fore reef. *Facies*. Vol. 56. pp. 173-177.
- Grachev, A. A., y Fairall, C. W. 2001. Upward momentum transfer in the marine boundary layer. *Journal Physical Oceanography*. Vol. 31. pp.1698-1711.
- Grigg, R.W. 1998. Holocene coral reef accretion in Hawaii: a function of wave exposure and sea level history. *Coral Reefs*. Vol. 17. pp. 263-272.
- Gulev, S. K., y Grigorieva, V. 2006. Variability of the winter wind waves and swells in the North Atlantic and North Pacific as revealed by the voluntary observing ship data. *Journal Climate*. Vol. 19. pp. 5667-5685.
- Guralnick, R.P., Hill, A.W. y Lane, M. 2007. Towards a collaborative, global infrastructure for biodiversity assessment. *Ecological Letters*. Vol. 10. pp. 663-672.
- Hanley, K. E., y Belcher, S. E. 2008. Wave-driven wind jets in the marine atmospheric boundary layer. *Journal AtmosphereScience*. Vol. 65. pp. 2646-2660.
- Hanley, K. E., Belcher, S.E. y Sullivan, P. P. 2010. A Global Climatology of Wind-Wave Interaction. *American Meteorological Society*. Vol. 40. pp. 1263-1282.
- Hemer, M.A., Church, J.A. y Hunter, J.R. 2010. Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. *International Journal of*

- Climatology. Vol. 30. pp. 475-491.
- Hemer, M., Katzfey, J., y Hotan, C. 2011. The wind-wave climate of the Pacific Ocean. PASAP final report. Canberra: DCCEE. 111 pp.
- Jensen, J.R. 1996. Introductory digital image processing. A remote sensing Perspective. Prentice Hall, 2a. Ed. 316pp.
- Kennedy, D., y Bishop, M.C. 2011. Google earth and the archaeology of Saudi Arabia. A case study from the Jeddah area. Journal of Archaeological Science. Vol. 38. pp. 1284-1293.
- Kinsman, B., 1965: Wind Waves. Prentice-Hall, 676 pp.
- Kono, T., y Tsukayama, S. 1980 Wave transformation on reef and some consideration on its application to field. Coastal Engineering in Japan. Vol. 23. pp. 45-57.
- Li, M., y Garrett, C. 1997. Mixed-layer deepening due to Langmuir circulation. Journal Physics. Oceanogr., Vol. 27. pp. 121-132.
- Lugo-Fernández, A., Roberts, H.H., y Wiseman, W.J. Jr. 1998. Tide Effects on wave Attenuation and Wave Set-up on a Caribbean Coral reef. Estuarine, Coastal and Science. Vol. 47. pp. 385-393.
- Maune, D.F. 2007. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd Edition, Edited by David F. Maune, PhD, CP, Published by ASPRS. 655 pp.
- Metternicht, G. 2006. Consideraciones acerca del impacto de Google Earth en la evolución y difusión de los productos de georepresentación. Geofocus. Vol. 6. pp. 1-10
- Montaggioni, L., F. 2005. History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: development patterns and controlling factors. Earth Sci. Rev. Vol 71. pp. 1-75.
- Munk, W.H., y Sargent, M.C. 1954. Adjustment of Bikini Atoll to ocean waves. U.S. Geological Survey Professional Paper., 260-C. pp. 275-280.
- Nasser, A., y Hatcher, B.G. 2000. Assessing the integrated growth response of coral reefs to monsoon forcing using morphometric analysis of reefs in Maldives. Proceedings 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia. Vol.1. pp. 23-27.
- Ott, R. L., y Michael L. 2010. An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis. (6a. ed.). Brooks/Cole, Cengage Learning. 1296 pp.
- Pagano, R. R. 2011. Estadística para las ciencias del comportamiento. 9a. Ed. Cengage Learning. 599 pp.

- Pinilla, R. C. 1995. Elementos de Teledetección. RA-MA. 344 pp.
- Potere, D. 2008. Horizontal Positional Accuracy of Google Earth's High-Resolution Imagery Archive. *Sensors*. Vol. 8. pp. 7973-7981.
- Roberts, H. H., Murray, S. P., y Suhayda, J. N. 1975 Physical processes in a fringing reef system. *Journal of Marine Research*. Vol 33. pp. 233-260.
- Roberts, H. H. 1980. Physical processes and sediment flux through reef lagoon systems. *Proceedings of Coastal Engineering*. pp. 1-17.
- Roberts, H. H., y Suhayda, J. N. 1983. Wave-current inter-actions on a shallow reef (Nicaragua, Central America). *Coral Reefs*. Vol. 1. pp. 209-214.
- Rogers, J. S., Monismith, S. J., Dumbar, R. B., y Kowek, D. 2014. Field observations of wave-driven circulation over spur and groove formations on a coral reef. *American Geophysical Union*. pp. 145-156.
- Rosen, B. R. 1982. Darwin, Coral Reefs, and Global Geology. *American Institute of Biological Sciences*. Vol 32 - 6. pp. 519-525.
- Salahuddin, A., y Curtis, S. 2009. Evolution of Mesoscale Convective Systems and its Relationship with the Madden-Julian Oscillation in the Indo-Pacific Region. *The open Atmospheric Science Journal*. pp. 141-154.
- Shinn, E. A. 2011. Spurs and Grooves. In: Hopley D. (Ed) *Encyclopedia of modern coral reefs, structure, form, and process* 17. Springer Science, New York. pp.1032-1034.
- Storlazzi, C., Logan, J., y Field, M. 2003. Quantitative morphology of a fringing reef tract from high-resolution laser bathymetry: Southern Molokay, Hawaii. *Geol. Soc. Am. Bull.* Vol. 115-11. pp. 1344-1355.
- Trenham, C.E., Hemer, M.A., Durrant, T.H., y Greenslade, D.J.M. 2013. PACCSAP Wind-wave Climate: High resolution wind-wave climate and projections of change in the Pacific region for coastal hazard assessments. *CAWCR Technical Report No. 068*. 44 pp.
- Vitart, F., Anderson, J. L., y Stern, W. F. 1997. Simulation of interannual variability of tropical storm frequency in an ensemble of GCM integrations. *Journal of Climate*, Vol. 10. pp. 745-760.
- Young, I.R. 1999. Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. *International Journal of Climatology*. Vol. 19. pp. 931-950.
- Young, I. R., Zieger, S., y Babanin, A. V. 2011. Global trends in wind speed and wave height. *Science*. Vol. 332. pp. 451-455.

ANEXO 1

Tabla 9. Matriz de parámetros morfométricos promedio a partir del procesamiento de 247 segmentos de 20x100 m en el perímetro arrecifal del atolón Puka puka. 163 de éstos contaron con al menos un macizo por segmento. S: segmento, F: frecuencia. El remarcado suave indica los segmentos donde no hubo macizos.

S	F	Orientación prom.(grados)	S	F	Orientación prom.(grados)	S	F	Orientación prom.(grados)	S	F	Orientación prom.(grados)
1	6	333.52	50	5	103.76	99	14	39.87	148	2	223.30
2	4	343.40	51	11	101.50	100	18	32.99	149	6	212.83
3	3	2.30	52	14	97.25	101	18	52.25	150	4	194.80
4	5	12.68	53	11	95.52	102	11	56.70	151	4	219.13
5	4	349.95	54	14	92.71	103	7	43.06	152	7	212.09
6	7	1.24	55	20	77.75	104	6	46.42	153	9	207.84
7	12	6.63	56	12	75.91	105	1	48.70	154	7	208.29
8	8	2.90	57	9	75.88	106	0	0.00	155	6	211.17
9	9	359.52	58	13	95.35	107	0	0.00	156	1	210.10
10	13	5.62	59	10	95.20	108	0	0.00	157	0	0.00
11	12	347.76	60	0	0.00	109	0	0.00	158	8	234.14
12	10	347.75	61	0	0.00	110	0	0.00	159	3	217.47
13	15	0.96	62	0	0.00	111	0	0.00	160	6	208.78
14	12	359.18	63	2	102.00	112	0	0.00	161	2	206.90
15	15	359.68	64	7	109.37	113	9	158.89	162	6	231.45
16	16	2.04	65	4	101.88	114	0	0.00	163	0	0.00
17	9	4.32	66	16	102.08	115	0	0.00	164	0	0.00
18	10	7.78	67	20	89.36	116	4	160.75	165	0	0.00
19	4	7.13	68	23	85.13	117	7	152.37	166	1	188.70
20	7	351.60	69	18	82.64	118	12	161.13	167	2	187.20
21	7	18.61	70	16	83.26	119	10	164.18	168	7	202.01
22	0	0.00	71	17	77.19	120	10	164.84	169	0	0.00
23	0	0.00	72	18	74.04	121	14	169.06	170	6	200.67
24	0	0.00	73	13	69.59	122	7	174.17	171	2	215.85
25	0	0.00	74	14	56.22	123	7	173.53	172	4	206.08
26	0	0.00	75	9	66.14	124	8	168.16	173	8	195.84
27	5	96.70	76	10	77.06	125	8	175.10	174	1	181.20
28	7	109.56	77	0	0.00	126	2	145.10	175	0	0.00
29	13	110.05	78	0	0.00	127	11	171.84	176	0	0.00
30	10	105.96	79	15	87.78	128	8	168.79	177	12	211.75
31	12	106.53	80	13	81.57	129	10	164.51	178	0	0.00
32	11	112.16	81	10	89.17	130	12	167.85	179	0	0.00
33	16	110.45	82	11	79.22	131	10	173.78	180	0	0.00
34	9	111.01	83	20	80.22	132	11	186.56	181	0	0.00
35	9	96.32	84	13	68.02	133	8	202.60	182	10	328.81
36	13	104.62	85	16	75.32	134	8	212.53	183	0	0.00
37	9	118.34	86	6	76.83	135	6	216.62	184	13	343.77
38	5	127.70	87	14	77.99	136	4	219.13	185	7	345.07
39	0	0.00	88	9	81.69	137	9	217.91	186	0	0.00
40	5	150.02	89	22	68.65	138	15	221.57	187	9	337.62
41	7	141.80	90	26	62.73	139	11	220.02	188	6	334.33
42	7	127.41	91	18	61.78	140	5	214.50	189	3	337.30
43	6	126.02	92	15	57.41	141	5	221.28	190	0	0.00
44	11	114.81	93	14	65.16	142	2	224.85	191	0	0.00
45	7	113.87	94	16	59.92	143	2	207.25	192	0	0.00
46	12	105.91	95	17	50.33	144	5	210.76	193	7	327.91
47	4	101.98	96	16	55.48	145	7	221.04	194	7	345.06
48	8	98.31	97	8	36.73	146	7	217.79	195	0	0.00
49	11	96.35	98	14	47.81	147	4	233.48	196	0	0.00

Continuación de la tabla 9.

S	F	Orientación prom.(grados)	S	F	Orientación prom.(grados)	S	F	Orientación prom.(grados)	S	F	Orientación prom.(grados)
197	0	0.00	210	0	0.00	223	0	0.00	236	0	0.00
198	0	0.00	211	0	0.00	224	0	0.00	237	0	0.00
199	2	313.10	212	0	0.00	225	0	0.00	238	0	0.00
200	1	319.60	213	0	0.00	226	0	0.00	239	0	0.00
201	0	0.00	214	0	0.00	227	0	0.00	240	0	0.00
202	0	0.00	215	0	0.00	228	0	0.00	241	0	0.00
203	0	0.00	216	0	0.00	229	0	0.00	242	0	0.00
204	3	318.43	217	0	0.00	230	0	0.00	243	0	0.00
205	0	0.00	218	0	0.00	231	0	0.00	244	0	0.00
206	0	0.00	219	0	0.00	232	0	0.00	245	0	0.00
207	0	0.00	220	0	0.00	233	0	0.00	246	5	296.00
208	0	0.00	221	0	0.00	234	0	0.00	247	13	304.43
209	0	0.00	222	0	0.00	235	0	0.00			

ANEXO 2

Tabla 10. Los 16 rumbos colaterales de orientación geográfica con una amplitud de 22.5 grados cada uno.

Noroeste	NW	315°	Sureste	SE	135°
Nornoroeste	NNW	337.5°	Sursureste	SSE	157.5°
Norte	N	0° o 360°	Sur	S	180°
Nornoreste	NNE	22.5°	Sursuroeste	SSW	202.5°
Noreste	NE	45°	Suroeste	SW	225°
Estenoreste	ENE	67.5	Oestesuroeste	WSW	247.5°
Este	E	90°	Oeste	W	270°
Estesureste	ESE	112.5°	Oestenoroeste	WNW	292.5°
4 Puntos cardinales	4 Rumbos laterales	8 Rumbos colaterales			

ANEXO 3

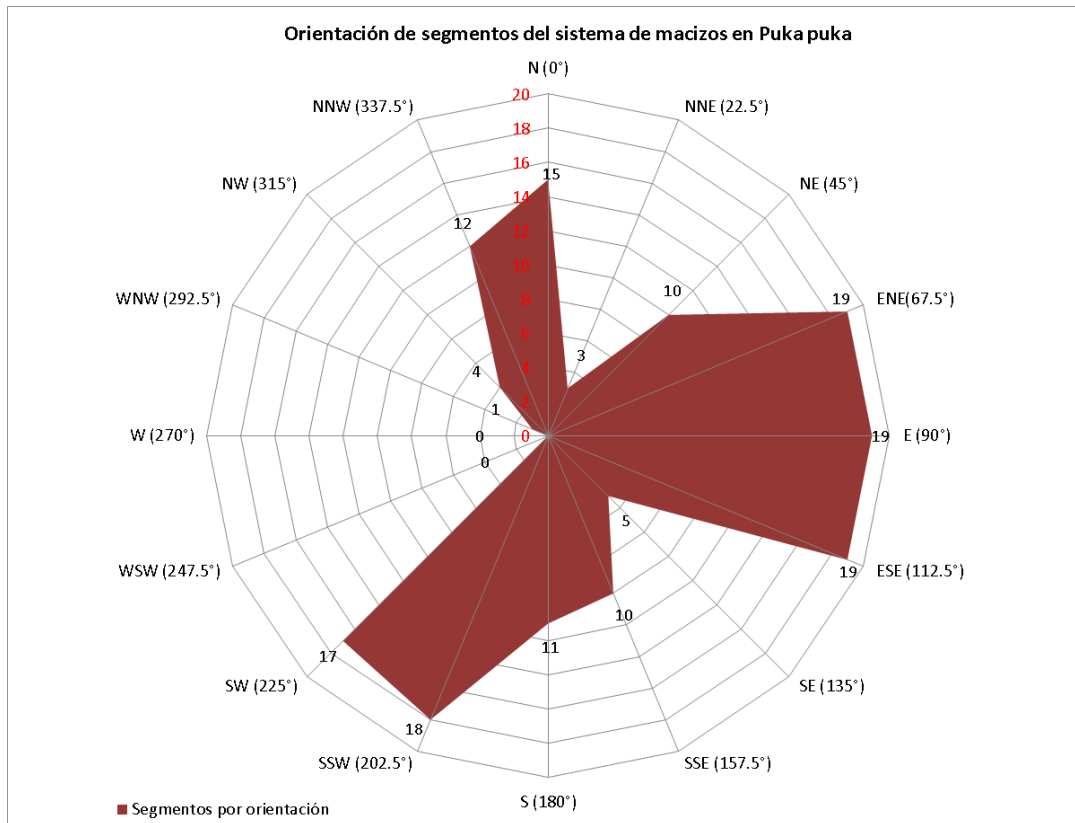


Figura 48. Orientación geográfica de los 163 segmentos con sistema de macizos en el Atolón Puka puka.

ANEXO 4

Tabla 11. Valores de los parámetros morfométricos por macizo de cada orientación geográfica.

Orientación geográfica	Frecuencia (# macizos)	Mediana del Área (m ²)	Mediana del Ancho (m)
N (0°)	132	47.8	4.9
NNE (22.5°)	51	50.8	5.5
NE (45°)	117	37.6	4.3
ENE(67.5°)	263	35.3	3.9
E (90°)	276	32.95	3.5
ESE (112.5°)	164	47.15	4.65
SE (135°)	32	64.3	5.5
SSE (157.5°)	94	81.65	5.75
S (180°)	68	82.8	6.35
SSW (202.5°)	106	93.7	7.4
SW (225°)	92	79.4	6.65
WSW (247.5°)	12	49.85	6.3
W (270°)	4	57.75	7.4
WNW (292.5°)	16	72.65	5.05
NW (315°)	23	69.7	6
NNW (337.5°)	67	56.5	5