



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



**PERFILADOR AUTOMATIZADO PARA
PLAYAS Y ZONAS DE ROMPIENTE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

PRESENTA

JUAN FRANCISCO VILLA MEDINA

LA PAZ, B.C.S., NOVIEMBRE 2021



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14
REP 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 08 del mes de Noviembre del 2021 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS para examinar la tesis titulada: “PERFILADOR AUTOMATIZADO PARA PLAYAS Y ZONAS DE ROMPIENTE” del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	VILLA	Apellido Materno:	MEDINA	Nombre (s):	JUAN FRANCISCO
-------------------	-------	-------------------	--------	-------------	----------------

Número de registro: B 1 6 1 0 0 8

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

“PERFILADOR AUTOMATIZADO PARA PLAYAS Y ZONAS DE ROMPIENTE”

trabajo de tesis tiene 5 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: *(Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original)*

Una vez analizado el resultado obtenido utilizando el software Turnitin, se consideró que el porcentaje de similitud es aceptable ya que se encuentra principalmente en el formato de la tesis (carátula, índice) y en oraciones cortas. Se determinó que las coincidencias son aceptables para establecer que no hay indicios de posible plagio.

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

“SATISFACE LOS REQUISITOS SEÑALADOS POR LAS DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS VIGENTES”

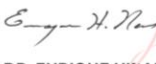
COMISIÓN REVISORA DE TESIS


DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ
Director de Tesis
Nombre completo y firma


DR. FRANCISCO ARREOLA SÁNCHEZ
Nombre completo y firma

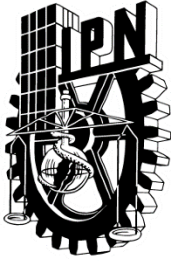

DR. HÉCTOR VILLALOBOS ORTIZ
Nombre completo y firma


DR. MIGUEL ÁNGEL PORTA GÁNDARA
Director de Tesis
Nombre completo y firma


DR. ENRIQUE HIPARCO NAVA SÁNCHEZ
Nombre completo y firma

Firmado digitalmente por Enrique H. Nava Sánchez
Nombre de reconocimiento (DN): cn=Enrique H. Nava Sánchez, o=Instituto Politécnico Nacional, ou=CICOMAR, email=enava@ipn.mx, c=MX
Fecha: 2021.11.08 23:05:51 -07:00

DR. SERGIO HERNÁNDEZ TRUJILLO
Nombre completo y firma
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 19 del mes de Noviembre del año 2021

El (la) que suscribe M en C. JUAN FRANCISCO VILLA MEDINA Alumno (a) del Programa

DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

con número de registro B161008 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ y DR. MIGUEL ANGEL PORTA GANDARA

y cede los derechos del trabajo titulado:

“PERFILADOR AUTOMATIZADO PARA PLAYAS Y ZONAS DE ROMPIENTE”

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: villa@7robot.net - vgomez@ipn.mx -

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

M en C. JUAN FRANCISCO VILLA MEDINA

Nombre y firma del alumno

Agradecimientos

Al CICIMAR-IPN por darme la oportunidad y brindarme lo necesario para la realización de mi trabajo de tesis a lo largo de estos años.

Mis agradecimientos al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR) por el apoyo brindado para mi superación académica. Gracias a mis asesores Dr. Víctor Manuel Gómez Muñoz y Dr. Miguel Ángel Porta Gándara por todo el tiempo y apoyo dedicado, por sus consejos y aportaciones en la dirección de este trabajo. Al Dr. Joaquín Gutiérrez por todo su apoyo, ánimo, consejos y aportaciones.

A mi esposa Viviana Flores y a mi hija Ana Lucía por su apoyo incondicional durante toda la realización de esta investigación, por su ánimo y tiempo gracias.

Al Dr. Francisco Arreguín, al Dr. Enrique Nava y Dr. Héctor Villalobos quienes aportaron sus ideas y apoyo para mejorar este trabajo, además de apoyarme durante todo el proceso.

Gracias a Carlos Soto Carrasco, Alfonso Álvarez Casillas y a Jorge Cobos Anaya del taller de maquinados del CIBNOR por sus enseñanzas, apoyo en la fabricación de diferentes piezas utilizadas en este trabajo y a la realización de pruebas del prototipo.

A Daniel Pillado, Ramón López Piñuelas, Mario Pillado, Martha Haro, Israel Barreras quienes me apoyaron en diferentes ocasiones a la realización de las pruebas necesarias para desarrollar y evaluar el prototipo desarrollado.

Al Dr. Bernardo Shirasago y Dr. Ángel Jiménez quienes fueron mis primeros profesores en CICIMAR y me dieron la bienvenida.

Gracias a mi familia por su apoyo y motivación, por su comprensión con mi falta de tiempo libre.

A todo el equipo de ToronjaLab por sus ánimos y apoyo.

A todos los profesores y compañeros que participan en el seminario de Oceanología en CICIMAR, que a lo largo de estos últimos años amplíé mis conocimientos en diferentes áreas y aportaron recomendaciones para mejorar mi trabajo, gracias a ellos. Gracias a Humberto Ceseña y Cesar Casas por su atención y apoyo, siempre con buena disposición.

Al Dr. Andrés Sandoval y Dra. Mónica Carreño del Departamento Académico de Sistemas Computacionales de la UABCS por su apoyo y ánimos para la realización de este trabajo.

Índice

Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción	3
1.1. Playas	4
1.2. Perfiles	4
1.3. Cambios estacionales en los perfiles de playa	5
1.4. Impacto de tormentas	6
1.5. Aporte y pérdida de sedimento	6
1.6. Aplicaciones de los perfiles	7
1.6.1. Factores antropogénicos	7
1.6.2. Construcciones costeras	8
1.6.3. Identificando usuarios	9
1.6.4. Interpretación de perfiles	10
2. Antecedentes	11
2.1. Métodos manuales	11
2.1.1 Método Emery	11
2.1.2 Vasos comunicantes	12
2.1.3. Método simple para una sola persona	13

2.1.4. Perfilador portable de una sola pieza, para una sola persona	14
2.1.5. Nivel Abney	15
2.2. Métodos topográficos	16
2.2.1. Nivel topográfico	16
2.2.2. Estadimetría	16
2.2.3 Estación total	18
2.3. Sistemas de Posicionamiento Global con Cinemática en tiempo real (RTK-GPS)	19
2.4. Fotogrametría utilizando UAV o Dron	21
2.4.1. UAV y procesamiento de imágenes	23
2.5. LIDAR	24
2.6. Perfilación de la zona de rompiente	25
2.6.1. Procesamiento de imágenes y análisis de píxeles	25
2.6.2. Moto acuática con ecosonda	26
2.6.3. Vehículos Remotamente Operados	26
2.6.4. Robot anfibio con patas	26
3. Justificación	27
4. Hipótesis	28
5. Objetivo	28
6. Área de estudio	28
6.1. Puerto Adolfo López Mateos	30
6.2. Agua Blanca	30

6.3. El Comitán	30
6.4. Balandra	30
6.5. El Tecolote	31
6.6. Punta Arenas	31
7. Materiales y Métodos	31
7.1. Principio de operación	32
7.2. Perfilador electrónico	35
7.3. Perfilador electrónico para playa y zona submarina	35
7.3.1. Prueba de concepto	35
7.3.2. Metodología para realizar el muestreo	36
7.3.3. Interpretación de datos	37
7.3.4. Prototipo preliminar	39
7.4. Desarrollo de perfilador subacuático de oruga	41
7.4.1. Vehículo subacuático de oruga	42
7.4.2. Estación remota	46
7.4.3. Algoritmo del Perfilador Subacuático de Oruga	47
7.4.4. Medición de perfil semiautónoma	47
7.4.5. Procedimiento de elaboración de perfiles	47
8. Resultados	49
8.1. Primer levantamiento	49
8.2. Pruebas con el prototipo final	54
8.3. Cambios en morfología a lo largo del año	59
9. Discusión y conclusiones	61

9.1. Dificultad para medir dentro del mar con otros métodos	62
9.2 Trabajo futuro	63
9.2.1 Perfilador Smartphone	64
10. Referencias	66

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de los ambientes sedimentarios en la zona litoral	4
Figura 2. Perfil submarino tipo barra-surco que se forma en invierno y perfil tipo berma que se forma en verano	5
Figura 3. Respuesta típica de una playa antes y después de una tormenta	6
Figura 4. Descripción gráfica del método Emery. Ambos postes miden 5' usados para medir perfiles de playa (Reconstruido y traducido conforme a Emery, 1961)	12
Figura 5. Diferencia de nivel en vasos comunicantes. (a) Dos tubos de acrílico indicando diferencia de nivel; (b) Esquema del método propuesto	13
Figura 6. Método de perfilación para una sola persona	14
Figura 7. Perfilación para una sola persona propuesto por Puleo (2008)	15
Figura 8. Método de nivel Abney. (a) Ejemplo de nivel Abney; (b) Medición de ángulo al visualizar por la mirilla el punto de referencia	15
Figura 9. Medición de diferencia de elevación con equipo topográfico	16
Figura 10. Método de estadimetría. (a) Marcas estadimétricas en mirilla de equipo topográfico; (b) Medición de distancia a partir de estadimetría	17
Figura 11. Estación total. (a) Ejemplo de una estación total y prisma en extremo de poste	18

Figura 12. En RTK-GPS, existen dos receptores GPS, uno se mantiene estacionario y otro puede moverse y se comunican entre ellos por un enlace de radio	20
Figura 13. Equipo RTK-GPS marca Trimble. (a) Estación base; (b) Estación móvil	21
Figura 14. Dron con estación base RTK-GPS para realizar fotogrametría	22
Figura 15. Equipo para realizar fotogrametría. (a) Sistema SenseFly eBee-RTK; (b) Ejemplo de recorrido y resultado logrado con fotogrametría	23
Figura 16. Resultado obtenido con fotogrametría en una playa. a) Área muestreada; b) Acercamiento a playa y modelo digital 3D	24
Figura 17. Se mide la distancia al suelo desde un vehículo aéreo posicionado por GPS	25
Figura 18. Vehículo remotamente operado, Surf Rover	27
Figura 19. Robot anfibio con patas para topografía	27
Figura 20. Planteamiento del problema	28
Figura 21. Playas en Baja California Sur elegidas como zona de estudio. (a) Puerto Adolfo López Mateos; (b) Agua Blanca; (c) El Comitán; (d) Balandra; (e) El Tecolote; (f) Punta Arenas	29
Figura 22. Procedimiento para realizar la medición con el vehículo automatizado	31
Figura 23. Modos en que se puede medir la distancia entre puntos. (a) Horizontal; (b) Inclinada	32
Figura 24. Gráfica con los valores acumulados de distancia horizontal y elevación (Perfil)	33
Figura 25. Equipo hermético con sensores de inclinación siendo recobrado con un cabo	36
Figura 26. Contenedor hermético para proteger inclinómetro	36
Figura 27. Datos de inclinación sin procesar con respecto al tiempo	37

Figura 28. Inclinaciones obtenidas de la prueba (Puerto Adolfo López Mateos)	38
Figura 29. Inclinaciones obtenidas de la prueba (playa Balandra, La Paz, BCS)	38
Figura 30. Comparación del perfil generado con el inclinómetro y batimetría en Puerto Adolfo López Mateos, B.C.S.	39
Figura 31. Perfil generado con inclinómetro vs batimetría en playa Balandra, B.C.S.	39
Figura 32. Pruebas de diseño en playas de Agua Blanca, B.C.S.	39
Figura 33. Pruebas de sistema de locomoción en playa El Comitán, prototipo preliminar	40
Figura 34. Prototipo preliminar, incorpora sensores	40
Figura 35. (1) Sensores Inerciales y Magnético; (2) Computadora abordo; (3) Odómetro; (4) Comunicación Inalámbrica; (5) Sensores de profundidad; (6) Sistema de tracción controlable	41
Figura 36. Sistema perfilador (las diferentes secciones se describen con su nombre en inglés)	42
Figura 37. Diseño del vehículo subacuático perfilador de oruga. (a) vista superior; (b) vista isométrica; (c) vista lateral; (d) vista frontal	43
Figura 38. Componentes principales que ensamblan al vehículo subacuático perfilador	43
Figura 39. Perfilador subacuático. (a) Partes sumergidas del PSO; (b) Estación remota	44
Figura 40. En proceso de desarrollo de las ruedas tipo oruga	45
Figura 41. Pruebas en Playa El Tecolote, La Paz, B.C.S., con nuevo prototipo	45
Figura 42. Interfaz gráfica de usuario (GUI) para ver el estado del vehículo	46
Figura 43. Cálculo del perfil a partir de datos de IMU y GPS	48
Figura 44. Procedimiento para generar el perfil después de las mediciones	49

Figura 45. Mediciones en playa El Tecolote, La Paz, B.C.S., con prototipo desarrollado	50
Figura 46. Mediciones bajo el agua cada dos metros para comparar métodos	50
Figura 47. Mediciones con equipo topográfico en playa El Tecolote, B.C.S.	51
Figura 48. Perfil generado vs profundidad medida y topografía	51
Figura 49. Datos antes de procesar (azul) y profundidad (verde)	52
Figura 50. Perfil generado en el segundo recorrido vs profundidad medida vs topografía	52
Figura 51. Datos antes de procesar (azul) y profundidad (verde), segundo recorrido completo	53
Figura 52. Acercamiento a los datos de inclinación de un recorrido	53
Figura 53. Puesta a punto del sistema perfilador para ser ingresado al mar	54
Figura 54. Comparación de perfiles utilizando el PSO y topográfico. (a) Ruta seleccionada con 3 m de playa; (b) Segunda ruta con 20 m de playa	55
Figura 55. PSO perfilando en la playa Punta Arenas, B.C.S. (a) Vehículo en zona de swash; (b) PSO entrando al mar; (c) Antena del radio modem flotando con su boya; y (d) Punto final del perfilado	56
Figura 56. Perfil generado con PSO en la playa Punta Arenas, B.C.S.	57
Figura 57. Lecturas del sensor de presión con 22 m de playa: (a) Dato de profundidad sin procesar; (b) Datos de profundidad filtrados; (c) Invertidos	58
Figura 58. Nivel del mar instantáneo (ISL), bajamar media (MLW) y el perfil generado con PSO con los datos de profundidad coincidentes en la playa Punta Arenas, B.C.S.	58
Figura 59. Perfil generado en marea alta con el PSO y comparado con datos de profundidad en la playa Punta Arenas, B.C.S.	59
Figura 60. Cambios en morfología a lo largo del año medidos utilizando equipo topográfico y el método Emery	60

Figura 61. Escarpe en playa Agua Blanca, B.C.S. generado luego del paso de una tormenta	61
Figura 62. Medición de profundidad con el vehículo perfilador detenido dentro del mar	62
Figura 63. Medición del perfil con incertidumbre y riesgo para el operador debido al oleaje	63
Figura 64. Coeficientes de arrastre para diferentes formas geométricas para número de Re aproximadamente a 104	64
Figura 65. Concepto de perfilador con Smartphone	65
Figura 66. Perfil generado a partir de datos obtenidos con un Smartphone	65

Resumen

Se ha diseñado, construido y validado un prototipo de vehículo subacuático para medir perfiles de playa que incluye la zona submarina. Este vehículo se utiliza en zonas que no son aptas para medir mediante batimetría o métodos manuales. El sistema consta de una estructura metálica propulsada por dos ruedas tipo oruga. Un acelerómetro electrónico y un receptor GPS proporcionan los datos del perfil. Estos componentes proporcionan la pendiente de la playa y del fondo marino así como la distancia recorrida a lo largo de la ruta. Los datos se guardan localmente y se transmiten hacia una computadora remota a través de un radio módem, estableciendo un enlace inalámbrico bidireccional, que también se usa para controlar el vehículo y reportar su estado. El sistema de perfilación ha sido probado en varias zonas de la costa de la parte sur de la Península de Baja California, México. Los perfiles se compararon con los obtenidos con un equipo topográfico. Los resultados obtenidos con el sistema subacuático de perfilación indican que el perfilador es una opción confiable.

Abstract

An underwater caterpillar vehicle has been designed and developed to profile along the beach and shoreface. This prototype is employed for zones that are unsuitable to study through bathymetry or manual measurements. The system consists of a metallic structure propelled by two caterpillar tracks. An electronic accelerometer and a GPS receiver measure the profile data. These components provide the seabed slope and the traveled distance along a path. The data are recorded locally and transmitted to a remote computer with a radio modem, conforming a wireless duplex link, which is also used for controlling the vehicle and reporting the status. The profiler system has been tested in several zones in the Pacific Coast of the Baja California Peninsula, Mexico and the results were compared with a topographic equipment. Based on the obtained results, the underwater caterpillar system evinces to be a reliable profiler option.

1. Introducción

Muchas playas en todo el mundo están sujetas a problemas asociados con la erosión y retroceso de la línea de costa. Las causas pueden variar con la ubicación y pueden estar relacionadas a fluctuaciones de corto plazo, o a tendencias a largo plazo asociadas con el déficit de sedimento acumulado, incremento en el nivel del mar y cambios en oleaje (Hanslow, 2007).

Los estudios para comprender los cambios en la morfología de playa, se pueden extender a todo el litoral, que se considera la zona de transición entre el continente y el medio marino y comprende desde el límite superior donde el oleaje durante las tormentas puede alcanzar, hasta el límite inferior donde el oleaje comienza a interactuar con el fondo. Se pueden reconocer tres subambientes (Guillén & Díaz, 1990):

Zona supralitoral. Es la que está afectada por el oleaje sólo durante los impactos de tormenta. Típicamente presenta formación de dunas y bermas, su límite superior presenta un cambio brusco en la pendiente o en la composición y distribución del material.

Zona interlitoral. Corresponde a la zona donde incide el oleaje con mar calmo entre su extremo superior e inferior. Puede presentar escalón, topografía rítmica o barras de arena. La costa está formada por las zonas supralitoral e interlitoral. El término de “playa” se designa cuando la costa está constituida por material no consolidado.

Zona infralitoral. Comienza después de la zona interlitoral y llega hasta el límite inferior donde el oleaje de tormentas toma acción.

Paralelamente a esta subdivisión de ambientes de la zona litoral, también se utiliza una terminología basada en las características del oleaje incidente, que se puede definir en cinco zonas que varían sus límites (Fig. 1).

Zona de plataforma. Es donde la topografía del fondo marino no tiene acción o afectación sobre el oleaje.

Zona de asomeramiento (shoaling) y refracción. Es la zona donde la ola es afectada por el fondo marino, y provoca que incremente su altura además de cambiar su orientación con relación a la topografía del fondo.

Zona de rompiente. Es donde la ola consigue su altura máxima y donde la fricción con el fondo frenan su desplazamiento y cambian sus características, que da como consecuencia su rompimiento.

Zona de surf. Es donde, después del rompimiento de la ola, ésta avanza hacia la costa creando una elevación en el frente de ola.

Zona de swash. En esta zona, el remanente de la ola llega a la línea de costa y asciende por la superficie de la zona interlitoral y posteriormente desciende por efecto de la gravedad.

Otra sección por destacar es la *Zona intermareal*, que está situada en el litoral entre los niveles de pleamar y bajamar.

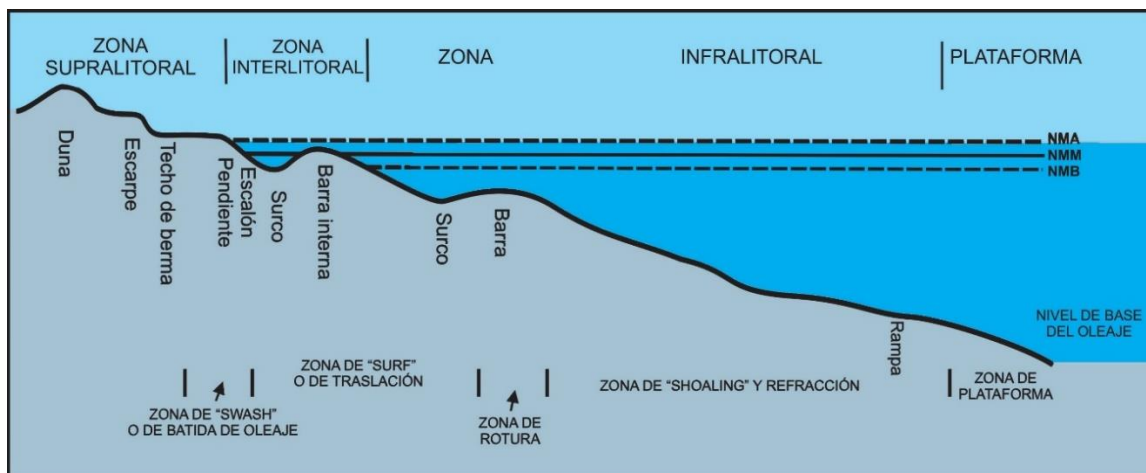


Figura 1. Esquema de los ambientes sedimentarios en la zona litoral (modificado de Guillén & Díaz, 1990).

1.1. Playas

Las playas son acumulaciones de sedimentos no consolidados en los límites donde el oleaje logra llegar. Las playas son importantes en la reducción del impacto de tormentas; playas grandes reducen el grado de erosión en la zona de dunas así como de evitar daños a las propiedades costeras. Proveen además de atracción a visitantes, lo cual contribuye a la economía local, de modo que es importante saber lo que pasa con ellas (Smith & Zarillo, 1990). Son ambientes dinámicos que pueden cambiar a lo largo del tiempo y distancias debido a procesos costeros diversos. Su forma está dada por las mareas, olas y viento que depositan o retiran sedimento, lo que cambia la morfología de la playa (Farris & List, 2007).

1.2. Perfiles

Los perfiles son una de las principales características de la morfología de las playas, que se representa típicamente como las diferencias de elevación a partir de datos de alturas en función de la distancia transversal a la costa. Al realizar mediciones continuas de perfiles en una zona particular, se registra la variabilidad temporal en la pendiente de playa, así como la altura de dunas y bermas, además de brindar una base para la estimación del volumen de playa (Puleo et al., 2008).

La evolución espacial y temporal de los perfiles de playa provee información útil para el entendimiento de los procesos costeros, y por lo tanto para el mantenimiento de las costas. Al investigar las costas, las mediciones de los perfiles de playa brindan información importante sobre fenómenos de erosión y acreción, efecto de tormentas, desarrollos costeros y sobre los efectos del calentamiento global, como podría ser el incremento en el nivel del mar (Shukla et al., 2017). La

información del perfil también puede ser usada para estimar la ubicación de escarpes, lo cual es importante para estimar las tendencias a largo plazo de la erosión de la costa (Hanslow, 2007).

La morfología que presentan las costas es el resultado entonces de la actividad constante entre hidrodinámica, geología y factores climáticos. Generalmente, la influencia de fuerzas naturales puede ser dividida en procesos de corta duración (horas o días) o de largo plazo (años). Los de largo plazo dan forma a la morfología de la costa en escalas espaciales del orden de kilómetros. Los de corta duración provocan un impacto considerable en una zona en pocas horas, como por ejemplo las tormentas (Krause, 2004).

1.3. Cambios estacionales en los perfiles de playa

Los cambios en la forma de los perfiles de playa ocurren como resultado de las condiciones del oleaje por los cambios de estación y las lluvias que conllevan. El patrón que resulta en los perfiles de playa se debe a la energía del oleaje (Fig. 2).

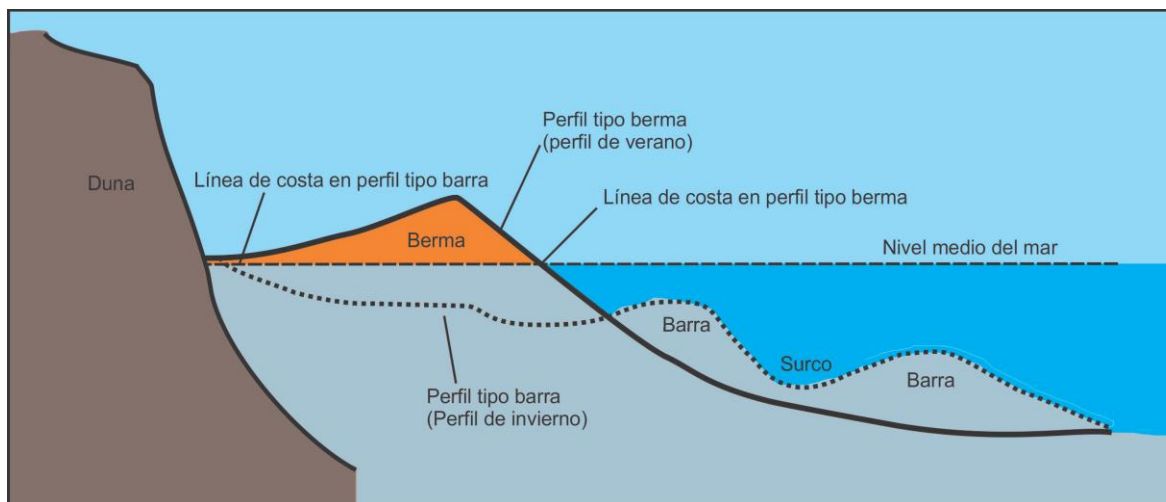


Figura 2. Perfil submarino tipo barra-surco que se forma en invierno y perfil tipo berma que se forma en verano
(Modificado de <http://fcit.usf.edu/florida/teacher/science/mod2/beach.profiles.html>).

A lo largo de varias costas, la actividad del oleaje es más fuerte durante los meses de invierno y calmo durante los meses de verano. Se han obtenido perfiles durante varios años para ilustrar esta oscilación entre estaciones (invierno vs verano). El resultado de estos estudios muestra que el sedimento de la playa no necesariamente se pierde con los eventos de erosión, sino que simplemente se mueven a la zona cercana a la costa para crear montículos de arena submarina (Lizárraga-Arciniega et al., 2007).

1.4. Impacto de tormentas

El sedimento arrastrado durante las tormentas es depositado temporalmente bajo el agua, en la zona cercana a la costa, con lo que se modifica el perfil de la playa. En condiciones de calma, las olas lentamente acarrean el sedimento de vuelta a la playa, para reconstruir el perfil original.

Un ejemplo de cómo una playa típica de Florida responde a una tormenta está dado en la Figura 3. Durante una tormenta, los niveles de agua se elevan, lo que permite al oleaje vigoroso acceder a la arena alta del perfil, que es almacenada en esa zona durante los tiempos de calma.

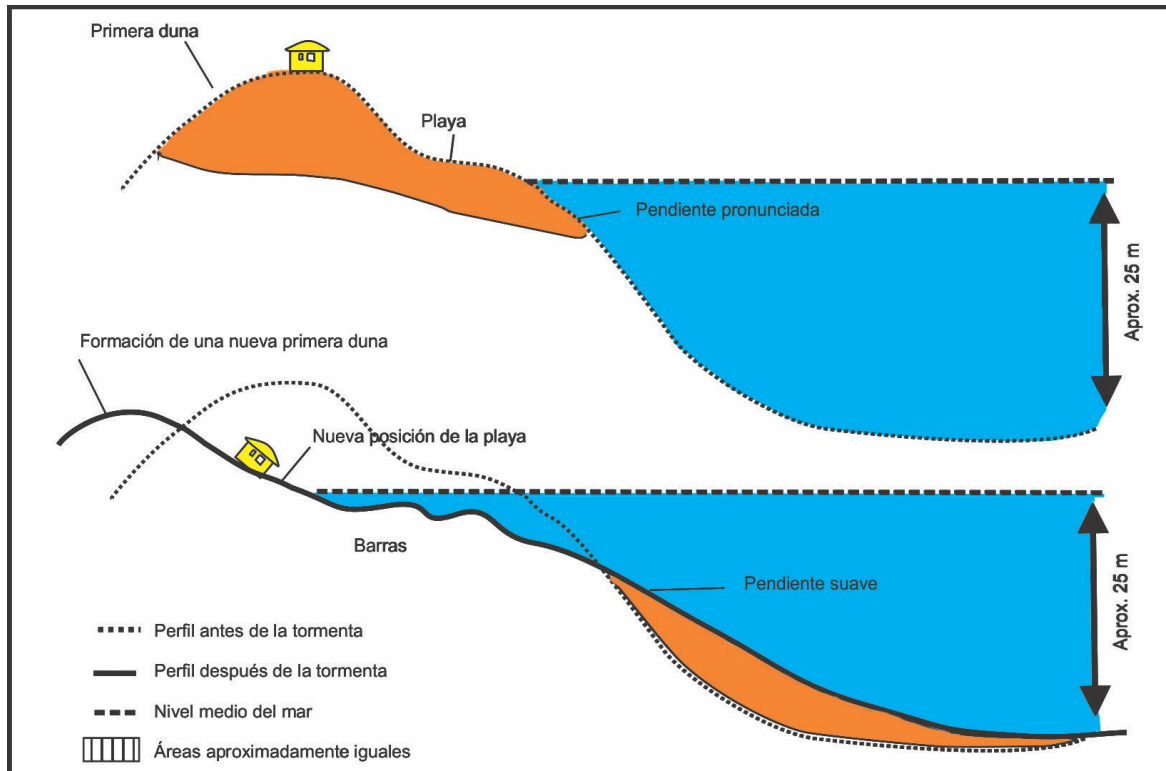


Figura 3. Respuesta típica de una playa antes y después de una tormenta (Modificado de <http://fcit.usf.edu/florida/teacher/science/mod2/beach.profiles.html>).

1.5. Aporte y pérdida de sedimento

En el litoral existen zonas de producción de sedimento llamados fuentes, así como zonas de consumo, llamados drenes o sumideros, mientras que todo en conjunto, forma una red de transporte de partículas sólidas (Vega-Crespo, 2004).

Fuentes de sedimento. Son cauces fluviales por ejemplo ríos u arroyos; acantilados en fase de retroceso; conchas marinas y otros elementos calcáreos; arrastre por el viento; vertidos artificiales producidos por obras de regeneración (minas, canteras, etc.)

Drenes o sumideros. Son los sitios en los que el sedimento sale del sistema normal de distribución o donde puede quedar atrapado como por ejemplo en obras de defensa costera; cañones submarinos; estuarios o ensenadas naturales; puertos; transporte por viento; dragados; desgastes por abrasión.

1.6. Aplicaciones de los perfiles

Medir los perfiles de playa y la dinámica de las playas es útil para modelar impactos futuros que podrían presentarse por el incremento en el nivel del mar. Esto es especialmente importante debido a que los cambios drásticos en la altura de la marea de tormenta pueden afectar negativamente las actividades humanas (Sahin & Mohamed, 2009). La manera ideal para monitorear los cambios en la morfología de las playas es calculando la totalidad del volumen de sedimento que se pierde o recupera. Para lograr este cálculo de forma precisa y confiable se requiere recopilar y procesar una inmensa cantidad de datos a lo largo del tiempo y espacio.

Los perfiles de playa han sido una herramienta útil para monitorear el volumen de playa y cambios en línea de costa con propósitos de investigación o planeación. Los cambios volumétricos al frente de playa son usados como indicador de los efectos de erosión por tormentas, ciclos El Niño-La Niña que provocan aguas superficiales más cálidas o frías respectivamente, cambios en el nivel del mar o trabajos de protección de costas como el rellenado de playas (Smith & Bryan, 2007).

A través de los datos de perfiles de playa, las tasas de erosión y acreción pueden ser evaluadas usando modelos matemáticos. Estos modelos son herramientas importantes para predecir la evolución geomorfológica a largo plazo. Son especialmente útiles cuando se analiza una gran cantidad de datos de perfiles (Chandrasekar & Mujabar, 2010).

Un manejo responsable de las playas requiere un conocimiento preciso tanto de las fluctuaciones a corto plazo como las tendencias a largo plazo para la evaluación de riesgos de una construcción costera existente, así como para la determinación de posibles afectaciones en desarrollos futuros. La evaluación de riesgos generalmente involucra la determinación del alcance de las afectaciones a corto plazo en la playa (debido a tormentas, desgarramientos, etc.), la extrapolación de tendencias pasadas de más largo plazo en la reducción de playas, así como la posibilidad de cambios futuros a corto y largo plazo debido al potencial cambio climático (Hanslow, 2007).

1.6.1. Factores antropogénicos

En los últimos años, la forma de la línea de costa ha sido influenciada considerablemente por factores antropogénicos. En consecuencia, la morfología de playa se puede utilizar como un indicador para dar seguimiento a los cambios que sufre una playa debido a procesos costeros. (Farris & List, 2007).

Dentro de las causas inducidas antrópicas, se considera que influyen en el sistema costero:

Interrupción en el transporte litoral. Es posiblemente el factor más importante de erosión, ya que al crear o tratar de controlar canales se realiza dragado fuera de la zona activa del litoral, además se construyen espigones o rompeolas, que interrumpen el abastecimiento de sedimento hacia la zona en cuestión.

Reducción del abastecimiento de sedimentos a la zona de litoral. En algunos lugares el aporte de sedimento a la costa por ríos forma la mayor fuente de aporte de material a la zona litoral. Por ejemplo, las represas construidas en estos ríos forman trampas de sedimento y se reduce el material requerido por las playas para conservarse.

1.6.2. Construcciones costeras

Son diversos los intereses que existen para realizar construcciones en la costa, principalmente para brindar protección de las fuerzas naturales como las olas de tormenta a la infraestructura que se encuentra cercana al mar.

Las estructuras de protección que se construyen se pueden clasificar como estructuras que impiden a las olas alcanzar la zona de puerto o estructuras cuya finalidad es el retardar el transporte litoral de sedimentos (Vega-Crespo, 2004).

El Departamento de Conservación y Recursos Naturales de Pensilvania (JoAnn & JoAnn, 2005) menciona que, desde hace siglos, se han implementado diferentes estrategias de ingeniería costera para proteger erosión como son:

Espigones. Los espigones son montones de rocas u otro material que se construye perpendicularmente a la costa y generalmente se extienden hasta el final de la zona de "surf". Crean o amplían playas al capturar el sedimento desplazado por el transporte litoral. Cuando la corriente golpea el costado del espigón, las partículas de sedimento se acumulan, de esta forma se pueden construir con éxito playas, pero también pueden causar erosión en el lado contrario al sentido de la corriente del transporte litoral.

Malecones o muros de contención. Un malecón es una estructura, por lo regular hecha de concreto, que se construye a lo largo de la línea de costa. Estos muros de contención se utilizan para proteger de la fuerza destructiva que genera el oleaje de tormenta a alguna zona o edificación que resulte de interés. Estas estructuras protegen lo que está detrás, hacia tierra firme, pero no protegen la zona de playa frente ellas.

Rompeolas. Los rompeolas protegen la costa de la energía del oleaje. Bloquean parcialmente las olas, por lo que hace que pierdan energía, esto provoca que el sedimento se acumule en ellas. Son paralelos a la línea de costa y pueden estar separados de la línea de costa o unidos por alguna escollera perpendicular a la línea de costa.

Rellenado de playa. El relleno de playa es el proceso de mover sedimento ya sea de mar adentro o de algún lugar cercano a la costa y depositarlo en la playa. Este método combate la erosión al reponer el material erosionado así como al suministrar sedimento nuevo al transporte litoral, lo que permite el crecimiento de las playas. El éxito de la alimentación depende de conseguir la mejor combinación entre tamaño de grano y la cantidad de sedimento a partir de las condiciones de oleaje. El relleno se debe repetir regularmente y tiene un alto costo económico.

1.6.3. Identificación de usuarios de perfiles

En términos generales, se puede clasificar a los usuarios que requieren medir los perfiles de playa según su área de interés (Mason et al., 2000):

Defensa costera. El término “defensa costera” se aplica tanto para la protección contra la erosión como contra inundaciones. Al implementar cualquier nuevo esquema de defensa, se requerirá algún tipo de estudio en la costa, seguido por un monitoreo posterior a la construcción, que incluye la zona tratada (vulnerable) así como a lo largo de la costa adyacente. El perfil de playa junto con su análisis para estimar cambios de volumen de sedimento ha sido identificado como un componente esencial en los procedimientos de planificación y evaluación para esquemas tales como recarga de playas, construcción de presas, construcción de espigones y dragado de playas (Pethick & Burd, 1993). Calcular cambios en el volumen de sedimento resulta además útil para validar modelos computacionales para transporte de sedimentos.

Manejo ambiental. Las áreas costeras están compuestas por diversidad de sitios con valor biológico, geológico, geomorfológico, paisajismo o cultura particular, cada uno con requisitos específicos de monitoreo. El estado de estas áreas solo se puede evaluar si se realiza algún tipo de monitoreo que incluya un levantamiento de perfiles de playa. Por ejemplo, la conservación del ambiente costero marino incluye la identificación de hábitats en la zona intermareal como áreas de alimentación de aves, y se deben considerar factores como la fragilidad, el tamaño, la diversidad y su historia registrada. Para lograrlo, se deben mapear y monitorear las playas (Pedroza et al., 2013).

Explotación económica. En proyectos como refinerías de petróleo, centrales eléctricas, puertos y centros vacacionales, se requieren estudios de impacto ambiental. Los levantamientos de ingeniería que se realizan para dichos estudios pueden incluir la realización de perfiles de playa. Se requieren levantamientos detallados cerca de los puertos comerciales para obtener la información requerida para operaciones de dragado. En áreas intermareales extensas, existen intereses económicos relacionados con pesquería, en particular lo relacionado con crustáceos y moluscos. Las necesidades de los pescadores están muy relacionadas con los intereses del monitoreo ambiental, ya que necesitan conocer las áreas precisas en donde el crecimiento de las especies que extraen sea el adecuado. Estas áreas son prácticamente las mismas que los hábitats de las aves, ya que las aves se alimentan de los moluscos (Sánchez-Arcilla & Jiménez, 1994; Yepes-Piqueras, 2007).

Prevención de inundaciones costeras. Conocer de forma precisa la morfología en la zona intermareal ayuda en la prevención de inundaciones costeras. Los cambios a corto plazo en el nivel del mar se deben principalmente a las mareas y a los efectos de tormentas. Los vientos asociados a tormentas pueden elevar o disminuir el nivel del mar varios metros en cuestión de horas y producir marea de tormenta. Si a esto se suman las mareas astronómicas normales, se pueden producir inundaciones en la zona costera si suceden en el momento de la pleamar. Los niveles de marea se pronostican comúnmente a través de métodos numéricos, y un conocimiento preciso de la batimetría es esencial para modelar correctamente la marea y el oleaje, particularmente en aguas poco profundas (Flather & Hubbert, 1990).

1.6.4. Interpretación de perfiles

Existen diversas técnicas analíticas para la evaluación e interpretación de datos de perfiles de playa. Se presentan dos enfoques de análisis, de carácter temporal y de carácter espacial. Las técnicas analíticas de carácter temporal evalúan los cambios a lo largo de los perfiles de playa con respecto al tiempo y pueden emplearse para identificar variaciones a corto plazo en el perfil de playa, como pueden ser afectaciones por tormentas, o las tendencias a largo plazo para un determinado sitio. Pueden ser útiles para identificar el modo en que un perfil de playa particular defiende de forma natural una costa. Las técnicas analíticas de carácter espacial evalúan las variaciones entre perfiles adyacentes y se pueden utilizar para determinar los cambios en los perfiles de playa a lo largo de la costa. Este es un tema de creciente importancia debido a una mayor conciencia en los administradores costeros de la naturaleza dinámica y compleja de los procesos costeros y la morfología. Las técnicas analíticas espaciales se pueden utilizar para identificar áreas de pérdida y ganancia de sedimento a gran escala (Cooper et al. 2000).

2. Antecedentes

Para el estudio de playas y geomorfología intermareal, así como para planeaciones costeras se requieren mediciones del perfil de playa, para ello, se tienen a disposición diversas opciones para la obtención de perfiles. Recientemente, Sistemas de Posicionamiento Global con Cinemática en tiempo real (RTK-GPS) y sistemas de fotogrametría se han convertido en una opción en muchos escenarios de generación de perfiles. Sin embargo, las técnicas menos avanzadas tecnológicamente permiten obtener datos de alta calidad sin el costo o requerimiento de personal de los métodos tecnológicamente más avanzados.

2.1. Métodos manuales

2.1.1 Método Emery

Uno de los primeros intentos para medir el perfil de playa fue ideado por Emery (1961). Su técnica requiere dos postes verticales graduados y una cuerda tensa de largo conocido y unida entre los dos postes en la base de estos de modo que apenas toque el sedimento. Se define la línea de perfil que se quiere medir, de modo que sea perpendicular a la línea de costa y se comienza la medición desde la parte elevada para finalizar a la orilla del mar. Se colocan los dos postes sobre la línea de perfil definida, separados entre ellos hasta tensar la cuerda que los une, uno de ellos estará sobre el inicio del perfil. Se recomienda que este punto se encuentre bien referenciado contra un objeto firme que no cambie de lugar con el tiempo, para poder realizar comparaciones entre perfiles futuros que se realicen.

Una persona entonces observa a través de uno de los postes hacia el otro poste que está en dirección al mar y utiliza el horizonte como nivel (Fig. 4). Por geometría, las diferencias de elevación medidas que el usuario observó es la misma que la caída vertical con referencia al nivel y a través de la distancia entre los dos postes (por ejemplo, la elevación que se mediría entre el nivel del sedimento en la base de ambos postes, a la altura donde está sujeta la cuerda). El poste que se encuentra en dirección a la tierra se recoge y se lleva en dirección hacia el mar, perpendicular a la línea de costa y el procedimiento se repite hasta completar el perfil.

Esta sencilla técnica de “poste y horizonte” mejor conocida como “El método de postes de Emery” o “Palos de Emery”, que con unas sencillas modificaciones y mejoras se ha utilizado tanto por investigadores como por voluntarios en estudios de monitoreo de la dinámica de dunas y playas, principalmente en E.U.A. (Hill et al., 2002; Komar, 1998).

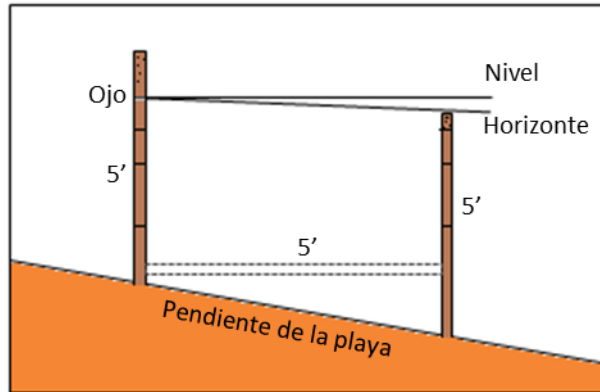


Figura 4. Descripción gráfica del método Emery. Ambos postes miden 5' usados para medir perfiles de playa (Reconstruido y traducido conforme a Emery, 1961).

Sin embargo, a pesar de su evidente simplicidad y ventajas sobre las técnicas topográficas tradicionales (como portabilidad y costo), el método ha tenido deficiencias, destacadas por el propio Emery. Para perfiles extensos, se requiere una corrección por la curvatura de la superficie de la tierra: cuando la corrección se aplica, la pendiente real aparenta estar más pronunciada que la pendiente calculada. Cuando el horizonte no es visible (por ejemplo, en un lago, detrás de una duna alta, o en un día con neblina), se debe conocer la distancia aproximada a un punto de referencia. Presenta error acumulativo debido a que la elevación se obtiene a partir de la suma de diferencias obtenidas entre dos lecturas.

Además, en el método Emery los postes tienen solo 5 pies (1.5 m aproximadamente) de separación (Emery, 1961), lo cual hace que el proceso sea innecesariamente largo en playas planas o con irregularidades evidentes.

2.1.2 Vasos comunicantes

Un método alternativo para perfilado de playas que presenta las ventajas del método Emery sobre el tradicional equipo topográfico mientras resuelve la mayoría de sus problemas ha sido utilizado por Andrade & Ferreira (2006). Este método está basado en el principio físico de vasos comunicantes, el cual establece que un fluido en vasos comunicantes forma una superficie en equilibrio hidrostático. Si ambos extremos de una manguera llena con agua se gradúan por igual y se colocan verticalmente una al lado de la otra, la diferencia de lecturas entre ellas indicará la diferencia de elevación (Fig. 5a). Para implementar este procedimiento se requiere una manguera de 6 m de largo y de 1 a 1.2 cm de diámetro; dos tubos transparentes de acrílico de 1.2 a 1.5 m de largo y de 1 a 1.2 cm de diámetro; dos postes graduados de 1.2 a 1.5 m de largo; sujetadores de plástico; 5 m de cuerda de nylon; y dos codos de plástico (90°) con el diámetro adecuado para unir con el tubo de acrílico y la manguera (Fig. 5b).

Se rellena con agua la manguera y el tubo de acrílico hasta la mitad. El perfil debe iniciar desde una marca fija y fácilmente identificable, los postes se sostienen verticalmente sobre la línea del perfil, apenas tocando la superficie del sedimento. La distancia entre postes está dada por el largo de la cuerda que sujeta los dos postes. Recomiendan que sea de 4-5 m. Cuando el nivel del agua en la manguera se estabilice, el usuario que sostiene cada poste lee y registra la medición indicada en los postes graduados. Se avanza a lo largo del perfil de modo que uno de los postes tome el lugar del otro hasta llegar al mar. Al final, los datos que se obtienen son similares al método Emery con la diferencia de no requerir el horizonte para nivelarse. Este procedimiento es más eficiente usando dos personas.

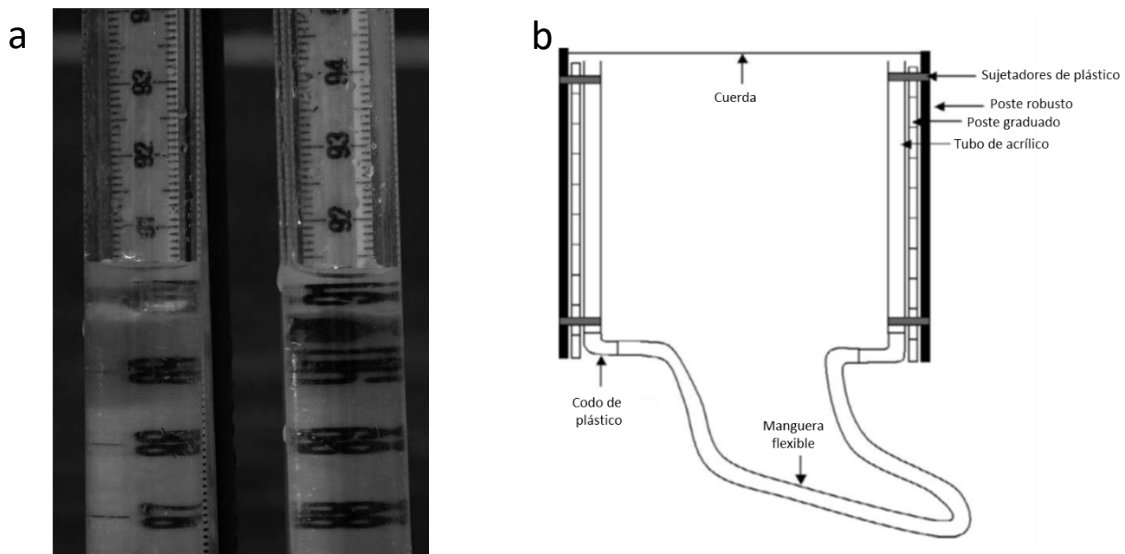


Figura 5. Diferencia de nivel en vasos comunicantes. (a) Dos tubos de acrílico indicando diferencia de nivel; (b) Esquema del método propuesto (Modificado de Andrade & Ferreira, 2006).

2.1.3. Método simple para una sola persona

Delgado & Lloyd (2004) describen un sencillo método para perfilar playas con una sola persona que es una extensión del método Emery. Su método utiliza un equipo de 2 piezas: un poste vertical, graduado y estacionario y una escuadra de 2 m de largo y 80 cm de altura con un ángulo fijo de 90 °. El poste estacionario se fija sobre la línea de perfil que se desea medir y se confirma su verticalidad. El usuario entonces toma la escuadra por el lado de 2 m, la nivela horizontalmente y coloca contra el poste estacionario, se deja descansar sobre el sedimento el extremo corto de la escuadra. Esta escuadra se coloca en dirección al mar. La lectura señalada en la intersección del poste vertical graduado y la escuadra se registra para obtener la diferencia de elevación entre los 2 m de separación. La marca que deja la escuadra en el sedimento sirve para ubicar el nuevo lugar donde será colocado el poste estacionario y el proceso se repite hasta terminar el perfil (Fig. 6).

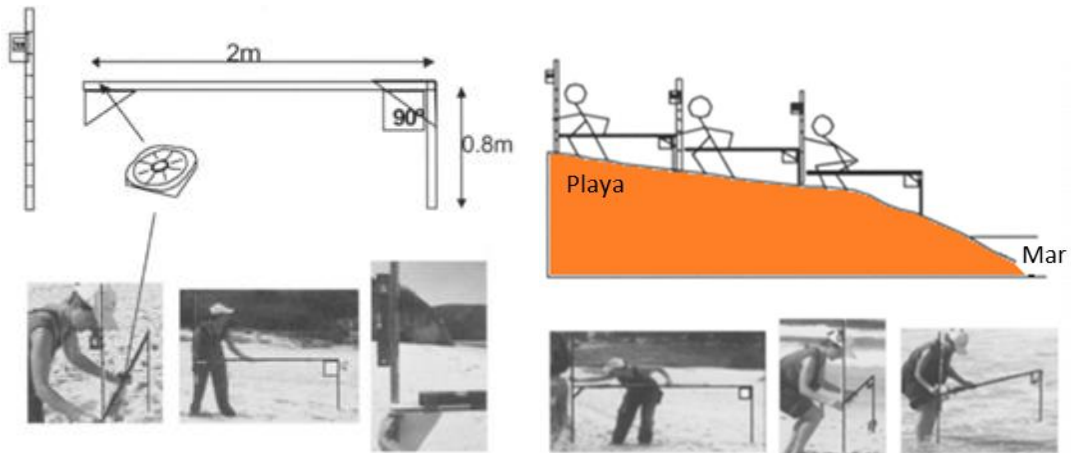


Figura 6. Método de perfilación para una sola persona (Modificado de Delgado & Lloyd, 2004).

Si bien este método aumenta la eficiencia comparado con el método Emery, tiene algunos inconvenientes. En primer lugar, requiere que el usuario coloque y deje fijo un poste vertical en el sedimento. Segundo, el método requiere dos piezas separadas, una desventaja que Delgado & Lloyd (2004) mencionan en su estudio. Los métodos mencionados anteriormente, pueden proporcionar perfiles de playa de una razonablemente alta calidad. Se requieren dos personas o pueden ser más eficientes usando dos personas.

2.1.4. Perfilador portable de una sola pieza, para una sola persona

Puleo et al. (2008) proponen un perfilador basado en el método Emery y para ello desarrollaron una estructura con 4 postes cuadrados de 2.5 cm de aluminio, al cual dieron forma del símbolo numeral (#). Se utilizan tornillos y tuercas de mariposa para unir los postes. La distancia horizontal entre los centros de tornillos es de 1 m. La distancia vertical entre los postes puede variar, pero se recomienda que sea de al menos 1 m (Fig. 7).

El poste que corresponde a la pata frontal del equipo es más largo que el poste de la pata trasera considerando pendientes pronunciadas. Para garantizar que el perfilador está en posición vertical, un nivel de burbuja se colocó a la pata frontal. Se colocó una cinta métrica de 2 metros en la pata

frontal para tener la graduación. Agregaron una barra de nivel hecha con una barra delgada de aluminio y equipada con un nivel de burbuja. Esta barra de nivel está unida a la pata trasera con un tornillo y se dejó libre para rotar. Cuando se nivela, la intersección entre la barra de nivel y la graduación en la pata frontal indica la diferencia de elevación. Para minimizar el hundimiento de las patas en el sedimento, colocaron una base de goma rígida de 1 cm de espesor y 9 cm por lado.

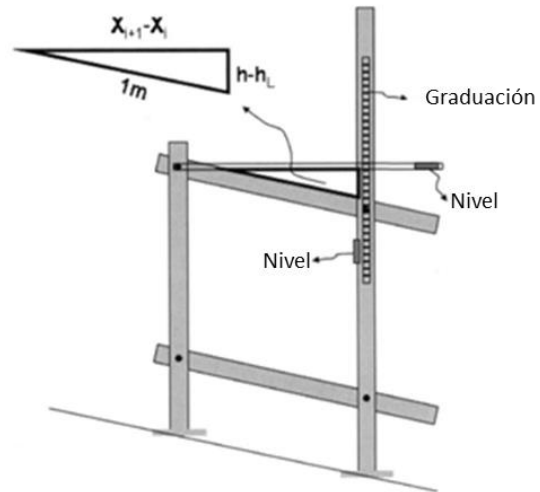


Figura 7. Perfilación para una sola persona propuesto por Puleo (2008).

2.1.5. Nivel Abney

Un método alternativo para generar perfiles de playa es al medir inclinaciones y distancia, que puede realizarse con un equipo manual como el nivel Abney y una cinta métrica. Varela et al. (2009) explican cómo utilizar el nivel Abney (Fig. 8a) para medir un perfil de playa. Se utiliza también una cinta métrica y un poste con una marca de referencia a una distancia conocida del suelo. El poste se coloca en cada lugar donde se presente un cambio de pendiente y se realiza la medición de inclinación al visualizar con la mirilla del nivel Abney la marca de referencia del poste mientras se mantiene nivelado el instrumento (Fig. 8b). La distancia se mide con la cinta métrica a lo largo del suelo, no de forma horizontal. En la siguiente medición, el observador con el instrumento toma el lugar del poste y este se desplaza al siguiente punto de medición. El proceso se repite hasta llegar a la orilla del mar.

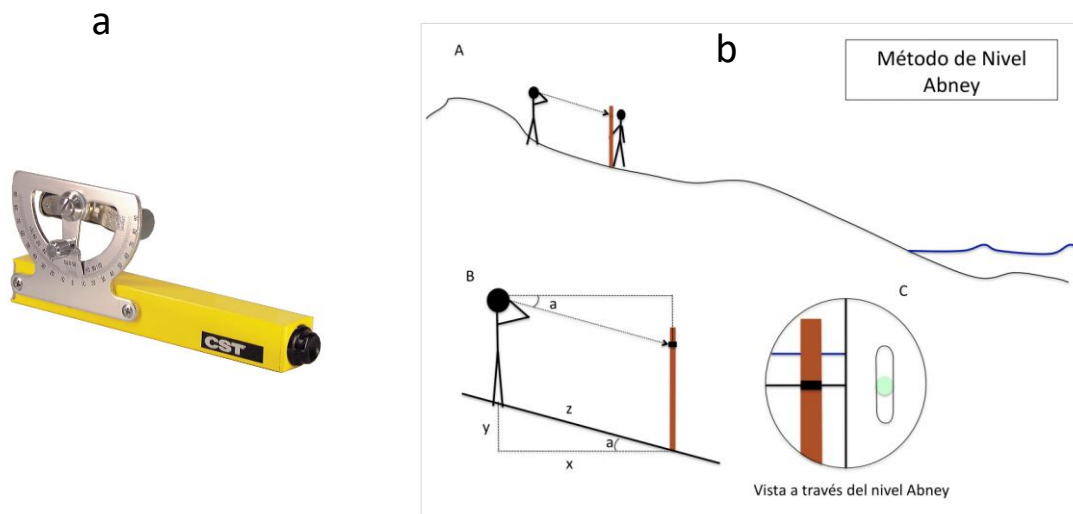


Figura 8. Método de nivel Abney. (a) Ejemplo de nivel Abney; (b) Medición de ángulo al visualizar por la mirilla el punto de referencia (Tomada de <http://www.oas.org/dsd/WHMSI/English/Workshops/WWF2009/Beach%20profiling%20instructions.pdf>).

2.2. Métodos topográficos

2.2.1. Nivel topográfico

Una modificación de las propuestas manuales anteriores es el uso de una mirilla nivelada en un trípode y un único poste graduado largo, que tiene una ventaja importante sobre los anteriores métodos y es que el error no es acumulativo debido a que la mirilla no cambia de ubicación.

Birkemeier (1981) mencionó que el método más deseable para perfilar playas era usar un nivel topográfico para determinar la elevación y una cinta para medir la distancia; aunque este procedimiento requiere un mínimo de 3 personas para un trabajo eficiente.

Una persona en tierra registra las lecturas observadas en el poste graduado a través de la mirilla, otro usuario sostiene y posiciona el poste graduado y una tercera persona realiza la medición con la cinta métrica. La diferencia entre la medición y la altura conocida de la mirilla indica el cambio de elevación entre la ubicación de la mirilla y la ubicación del poste (Fig. 9). El procedimiento se repite en las siguientes ubicaciones a lo largo del perfil, de forma similar al método Emery.

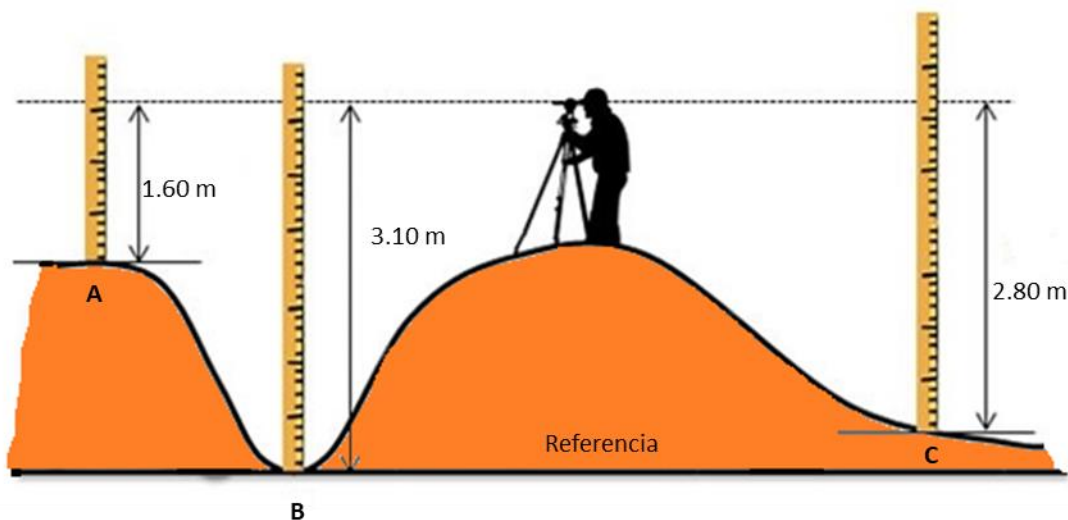


Figura 9. Medición de diferencia de elevación con equipo topográfico (Modificada de <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/nivel-de-topografia>).

2.2.2. Estadimetría

Un método que solo requiere dos personas es el método estadimetría. A diferencia del nivel topográfico, no se requiere una cinta métrica para realizar la medición de distancia entre puntos, dado que en el método por estadimetría, la elevación y distancia a cada punto se determinan a partir de 3 mediciones en el poste graduado usando el equipo topográfico nivelado ubicado en la línea del perfil. El equipo topográfico cuenta en su mirilla además de los dos hilos principales, el horizontal y el vertical para la bisección, otros dos hilos secundarios llamados estadimétricos

situados sobre el hilo vertical (Fig. 10a). Las lecturas son tomadas de los 3 hilos horizontales, la medición central se usa para calcular la elevación, y las dos líneas restantes (superior e inferior) se utilizan para determinar la distancia (Fig. 10b). Las ventajas son la velocidad y el hecho de que cada punto de medición se determina de manera independiente de los otros. La principal desventaja es que las distancias a lo largo del perfil se obtienen de manera indirecta (Gemin et al., 2011).

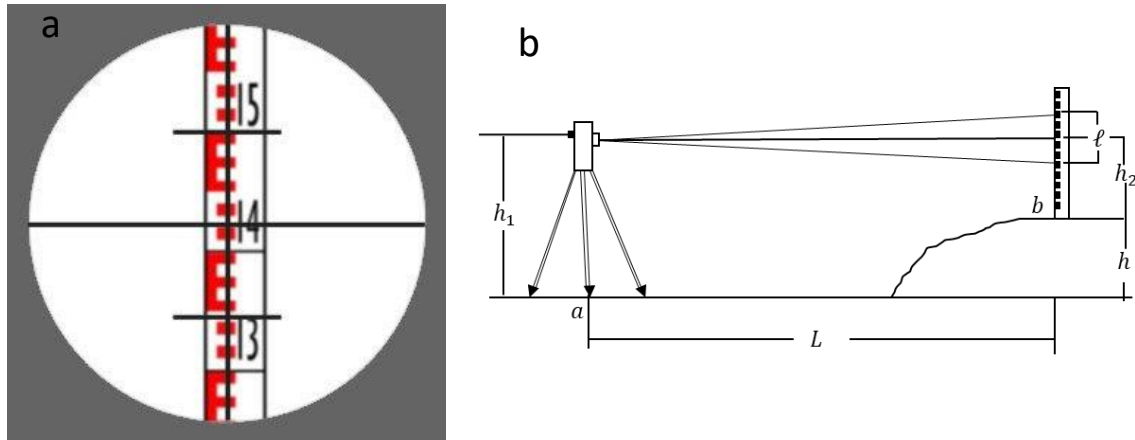


Figura 10. Método de estadimetría. (a) Marcas estadimétricas en mirilla de equipo topográfico; (b) Medición de distancia a partir de estadimetría.

La precisión de cualquier método topográfico depende de diversos factores, como las condiciones del clima, el ángulo del sol, fatiga, y la experiencia y cuidado de los operadores. Si el instrumento está apropiadamente alineado y nivelado, y el poste graduado está vertical, la precisión de la elevación de un punto de medición utilizando estadimetría, es igual a la precisión que se leyó en el poste graduado. La precisión de la distancia, de igual modo, va a depender de la precisión de las lecturas del poste graduado y se puede calcular como:

$$D = K_1 * (E_S - E_I) + K_2 \quad (1)$$

Donde:

D = Distancia

E_S y E_I = Medición de estadía superior e inferior, respectivamente

K_1 = Multiplicador de estadimetría (Típicamente $K_1 = 100$)

K_2 = Constante de distancia focal, que varía con el instrumento

El procedimiento de estadimetría tiene un alcance limitado y una precisión media a baja, razón por la cual ha sido reemplazado por las determinaciones distanciométricas (Sánchez et al., 2001).

2.2.3 Estación total

Cheng et al. (2016) realizaron levantamientos de perfiles de playa utilizando una estación total, que sigue el principio básico del equipo topográfico como nivel-teodolito, y típicamente requiere dos personas, una encargada del instrumento y otra encargada de un poste con un prisma en su extremo superior (Fig. 11a). Utilizaron un poste de 4 m de longitud con prisma y se colocó una pata plana en el extremo inferior para evitar que se enterrara en el sedimento suelto y con ello garantizar la precisión en la medición. Se observó que una terminación puntiaguda suele penetrar entre 5 y 10 cm en la arena.

Antes de iniciar el levantamiento con la estación total, se requiere ubicar de forma precisa el lugar donde se instala el instrumento y el punto de referencia fijo a partir de los cuales la orientación del levantamiento se puede calcular. Los puntos donde se coloca el instrumento y el punto de referencia fijo se suelen establecer de forma perpendicular a la línea de costa con el fin de obtener el perfil de playa. Se colocan dos conos anaranjados sobre la línea del perfil de playa de modo que sean visibles para la persona con el poste y se le facilite mantener la línea del perfil. La ubicación del instrumento se establece clavando dos estacas de madera o postes de PVC, normalmente en la zona de duna, donde se encuentren lejos de disturbios antropogénicos y tienen poca probabilidad de ser erosionados. Estas dos marcas semipermanentes establecen puntos que pueden ser utilizados en levantamientos subsiguientes y ocupar el mismo lugar, lo que permite una comparación a lo largo del tiempo.

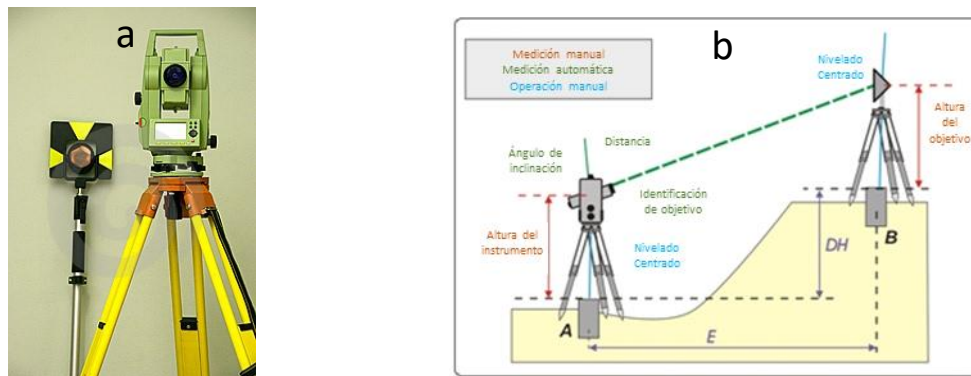


Figura 11. Estación total. (a) Ejemplo de una estación total y prisma en extremo de poste (tomada de <https://deliatopografia.blogspot.com/2018>); (b) Ilustración de la operación de una estación total.

Cuando se va a realizar el levantamiento, la estación total requiere típicamente 3 parámetros de entrada: (1) La ubicación del instrumento, para especificar donde se colocó la estación total; (2) La orientación de la línea de perfil; (3) la altura del instrumento y el largo del poste con el prisma. Con base en los primeros dos parámetros se obtiene la ubicación de los puntos donde se realice mediciones utilizando su ángulo y distancia con respecto al punto de referencia fijo, lo cual es automáticamente calculado por el procesador interno de la estación total. La primera medición suele ser la medición al punto de referencia fijo. Es importante comparar la lectura de la estación

total con la ubicación y elevación conocida del punto de referencia. Esto asegura que no se cometieron errores al configurar el instrumento. El procedimiento para realizar la medición es ubicar con la mirilla del instrumento el prisma que se encuentra en el extremo superior del poste y entonces enfocar y centrarlo en la mirilla del instrumento para finalmente ordenar a la estación total que realice la medición. A partir de la distancia que obtiene con su medidor electrónico de distancia y el ángulo de inclinación y orientación se calcula automáticamente la ubicación del punto incluyendo su elevación (Fig. 11b). En lugar de utilizar puntos de medición a intervalos de distancia fijos, lo cual puede pasar por alto características como escarpes, la persona con el poste y prisma decide la ubicación de los puntos de medición con el fin de capturar todos los cambios importantes en la topografía.

Este método puede ser utilizado para medir dentro del mar siempre y cuando las condiciones de oleaje lo permitan.

2.3. Sistemas de Posicionamiento Global con Cinemática en tiempo real (RTK-GPS)

Los sistemas GPS de grado topográfico comerciales más precisos, son igual de precisos que los métodos topográficos convencionales cuando se realizan mediciones con pausas en cada punto a medir. Por ejemplo, Clark y Lee (1998) encontraron errores de elevación de 2 a 3 cm al hacer un levantamiento en campo de esta forma. La precisión disminuye cuando la medición se realiza con un vehículo en movimiento en modo RTK-GPS, con errores de 4 a 9 cm.

El sistema de posicionamiento global cinemático en tiempo real (RTK-GPS) se ha convertido en un elemento importante en los levantamientos topográficos. RTK es una técnica que se utiliza cuando la precisión es imprescindible. En RTK, la señal GPS corregida se transmite en tiempo real desde un receptor base en una ubicación conocida a uno o más receptores móviles. Con los avances recientes en los sistemas GPS basados en RTK, se puede lograr una precisión horizontal de 1 cm al compensar el retraso atmosférico, los errores orbitales y otras variables en la geometría de referencia del GPS (Ehsani et al., 2004).

En un sistema RTK, existen dos receptores GPS, uno funciona como estación de referencia y otro como una estación móvil, cada uno con su respectiva antena receptora GPS, además de un enlace de radio comunicación entre ellos, llamado comúnmente radio-módem. Los sistemas por lo regular utilizan dos receptores GPS y dos radio-módems idénticos tanto en la estación base como en la estación móvil. La estación base funcionará como transmisor hacia la estación móvil que recibirá la señal que representa la corrección para mejorar así el cálculo de su ubicación (Fig. 12).

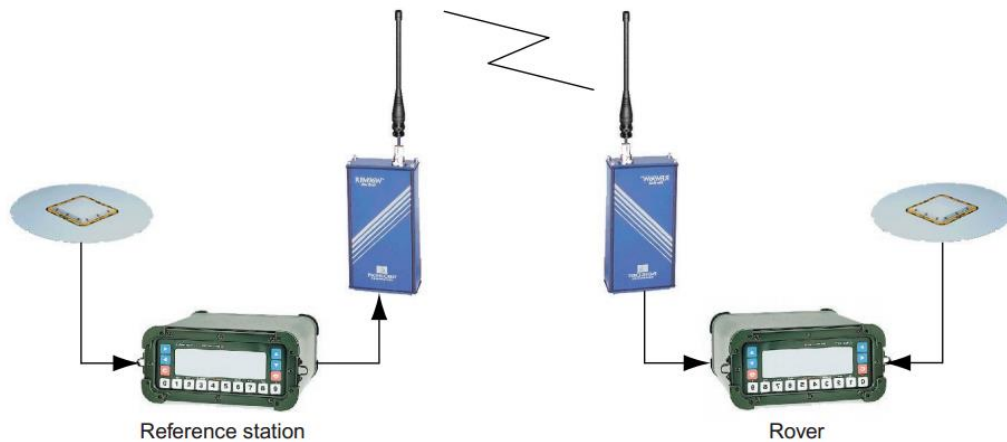


Figura 12. En RTK-GPS, existen dos receptores GPS, uno se mantiene estacionario y otro puede moverse y se comunican entre ellos por un enlace de radio (tomada de Langley, 1998).

Para lograr el mejor resultado, la estación base se debe colocar en un punto libre de obstrucciones hacia los satélites y la antena del enlace de radio debe estar lo más alto posible para maximizar la cobertura del enlace. Algunos equipos RTK utilizan receptores que combinan GPS y la constelación rusa GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) tanto en la estación base como en la móvil. Usar datos de la constelación GLONASS adicionales a GPS ofrece una ubicación más rápidamente y una precisión mayor (Langley, 1998).

Aunque se puede lograr buena precisión en un levantamiento topográfico utilizando sistemas RTK-GPS, hay casos donde la precisión de estos sistemas es cuestionable. Cualquier obstrucción ya sea por la vegetación, montaña o edificación, puede limitar el uso de los sistemas GPS o incluso impedir que se pueda utilizar. En esos casos, se puede utilizar la estación total. Borgelt et al. (1996) compararon la precisión de sistemas RTK-GPS contra una estación total y reportaron errores en elevación de 12 cm, concluyen que para mediciones precisas se debe de utilizar la estación total.

Kizil & Tisor (2011) utilizaron un equipo Trimble 5700 RTK-GPS (Trimble Navigation Ltd., Sunnyvale, California) para realizar un levantamiento topográfico en Dakota del Norte, Estados Unidos, cubriendo un área de 50 ha con RTK y realizaron un recorrido en cuadrícula (Fig. 13). Se mantuvo una velocidad de operación de 5 a 10 km/h. Para mantener la orientación lineal en los levantamientos, utilizaron un equipo GPS manual Garmin GPSmap 76C.

La serie de datos obtenidos se almacenaron originalmente como una serie de puntos. Cada punto tiene valor de latitud, longitud y elevación y con estos datos se pueden generar perfiles, mapas de contorno o lo que sea de interés.

El procedimiento para medir perfiles de playa con RTK-GPS es simplemente recorrer una línea perpendicular a la línea de costa y registrar algunos puntos a lo largo del recorrido con la estación móvil montada en un poste. Si se hace una pausa en cada punto, se elevará la precisión en la ubicación. Para recorridos extensos, se puede registrar de forma continua sin necesidad de hacer pausas, reduciendo un poco la precisión.



Figura 13. Equipo RTK-GPS marca Trimble. (a) Estación base (tomada de <https://dronak.com/equipamiento-de-drones>); (b) Estación móvil (tomada de <http://www.fertoing.com/equipment/geodetic/trimbler8>).

2.4. Fotogrametría utilizando UAV

Un UAV (Vehículo aéreo no tripulado) o dron moderno de grado topográfico incluye abordo un sistema de navegación y piloto automático, un motor y batería para su propulsión, además de una cámara digital para capturar imágenes. Para ampliar más allá del levantamiento topográfico, también existe una gama en constante crecimiento de sensores terrestres y atmosféricos que pueden ser agregados. La persona que opera el vehículo utiliza una tableta electrónica o una computadora para planear, monitorear y, si es necesario, modificar la misión durante el vuelo. Se cuenta también con un enlace de radio para mantener la comunicación con el vehículo aéreo. Información detallada se puede encontrar en Colomina & Molina (2014) y Nex & Remondino (2014).

Fundamentalmente, existen dos tipos de diseños para drones: de ala fija o multirrotor (por ejemplo “Cuadrícópteros”). Cada uno tiene sus ventajas particulares en aplicaciones específicas, los drones de ala fija se adaptan en levantamientos topográficos a lo largo de la costa, dado que su trayectoria de vuelo normalmente “lineal” coincide típicamente con la geometría de la línea de costa.

Los drones fabricados para el mercado topográfico profesional no requieren un operador con experiencia para volar. El operador se encarga de definir la región de terreno a medir y la resolución espacial que se requerirá, el software de plan de vuelo automáticamente calcula los movimientos que el dron realizará en el aire y en qué posiciones tomar las imágenes aéreas.

El operador se encarga de supervisar el recorrido y no de controlar el aparato durante el vuelo, aunque por cuestiones de seguridad, puede tomar el control en cualquier momento por medio del enlace de radio.

El despegue y aterrizaje del vehículo en una ubicación específica es completamente automatizado, por lo que no requiere la intervención del operador.

Los avances recientes en tecnología referente a los drones, resulta benéfico para los investigadores costeros, en los últimos años se comercializaron vehículos listos para usar y que integran un posicionamiento RTK-GPS de alta precisión. El posicionamiento RTK-GPS de la cámara, combinado con el alto grado de superposición de imágenes, elimina la necesidad de realizar levantamientos topográficos adicionales en la zona (Fig. 14).

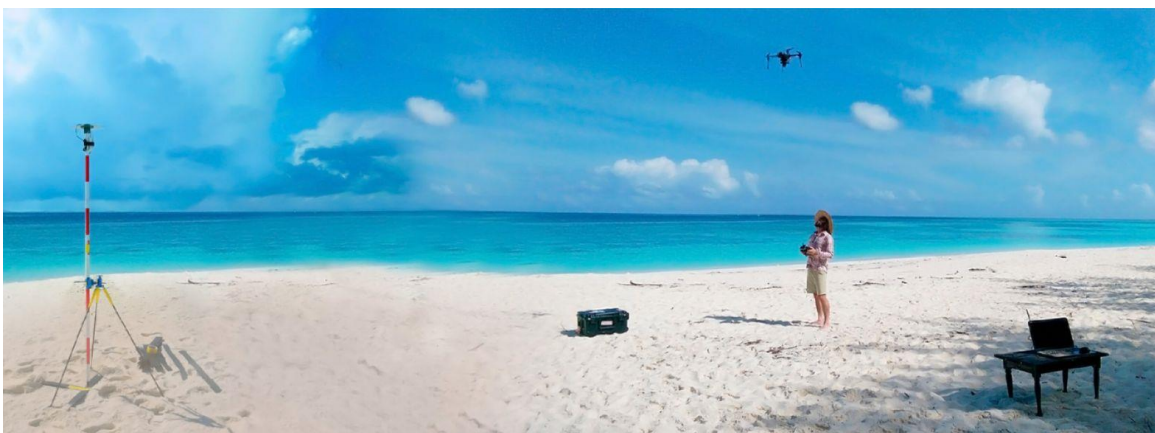


Figura 14. Dron con estación base RTK-GPS para realizar fotogrametría (tomada de <https://emlid.com/ppk-mapping>).

Si el dron no cuenta con RTK-GPS, se requeriría establecer puntos de control terrestres a lo largo del levantamiento y se deben posicionar de forma precisa para considerarlos en el posproceso de los datos de imagen. Estas marcas terrestres son cuadros marcados u otro objeto fácilmente identificable desde las imágenes aéreas, y que su ubicación precisa debe medirse con equipo RTK-GPS.

Eliminar el uso de los puntos de control en tierra tiene dos principales ventajas, la primera es la reducción considerable del tiempo total de levantamiento. La segunda es en las áreas costeras menos accesibles, por ejemplo, en los humedales o los acantilados costeros, se pueden realizar levantamientos sin mayor complicación. Otro avance importante y que ahorra tiempo al momento de realizar levantamientos es que los vehículos de grado topográfico modernos ahora incorporan acceso automático a las redes de estaciones de referencia de funcionamiento continuo (CORS) a través de tarjetas SIM convencionales para celular. Estas redes de estaciones base RTK permanentes, que transmiten correcciones a través de Internet en tiempo real, son cada vez más comunes, ya sea que se utilice en tiempo real o se puede acceder a los datos registrados durante el posprocesamiento de los datos. Para las personas que realizan levantamientos topográficos, este tipo de estaciones base RTK le proporcionan la gran ventaja de no necesitar poseer ni montar su propia estación en cada levantamiento para lograr la corrección RTK (Rizos, 2007).

Estructura desde el movimiento (SfM - Structure from Motion) es una práctica que se ha dado en la última década, se utiliza para generar reconstrucciones tridimensionales a partir de una serie de fotografías superpuestas (Schonberger & Frahm, 2016).

SfM es adecuado cuando se cuenta con un conjunto de imágenes del área que se desea inspeccionar y que tengan un alto grado de superposición. El resultado permite inspeccionar desde diferentes posiciones y orientaciones diferentes, para lo cual una cámara móvil se relaciona con un objeto estacionario. Se detectan automáticamente miles de objetos coincidentes, así como características de textura en múltiples imágenes superpuestas que se toman de la superficie del suelo a estudiar, de las cuales se genera una nube de puntos de alta densidad de posiciones 3D. Un resumen completo desde una perspectiva más detallada se puede consultar en Westoby et al. (2012).

Los proveedores comerciales de drones RTK-GPS diseñados para levantamientos topográficos generalmente adecúan el software de posprocesamiento y visualización de datos con el hardware que producen para facilitar su uso. Generalmente el software incluye orto-mosaicos, modelos digitales de superficie, visualización 3D con capacidad de vuelo directo.

2.4.1. UAV y procesamiento de imágenes

Turner et al. (2016) realizaron un levantamiento utilizando un dron RTK-GPS de ala fija, el SenseFly eBee-RTK (Fig. 15a) que se fabrica comercialmente para realizar levantamientos topográficos profesionales. Tiene una envergadura de un poco menos de 1 m y un peso de 700 g, tiene una autonomía de batería de aproximadamente 40 minutos que permiten una cobertura de aproximadamente 2 km² en condiciones de poco viento, o áreas menores en condiciones de viento de hasta 45 km/h. El equipo se puede transportar con facilidad entre sitios y se pueden realizar cambios de batería si se requiere explorar más área. El posprocesamiento de imágenes para generar el levantamiento 3D para el análisis de erosión por tormentas lo realizaron utilizando un paquete de software SfM comercial (Pix4D Postflight Terra) diseñado para aplicaciones topográficas, que genera de forma automatizada orto-mosaicos georreferenciados, DSM, curvas de nivel, nubes de puntos 3D y modelos de malla texturizada en una gran variedad de formatos (Fig. 15b).

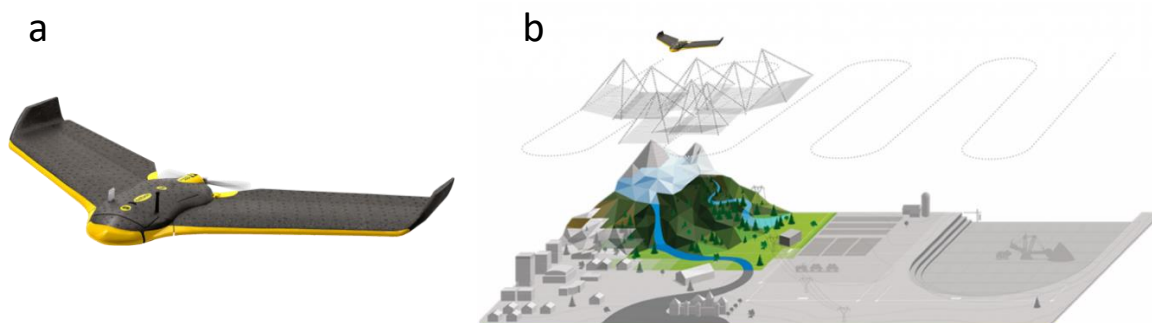


Figura 15. Equipo para realizar fotogrametría. (a) Sistema SenseFly eBee-RTK (tomada de <https://www.sensefly.com>); (b) Ejemplo de recorrido y resultado logrado con fotogrametría.

Turner et al. (2016) realizaron una comparación entre los datos generados con el dron y un levantamiento en una playa (Fig. 16) utilizando RTK-GPS en una motocicleta todo terreno y obtuvieron una diferencia promedio de 2.6 cm y una desviación estándar de 6.8 cm.



Figura 16. Resultado obtenido con fotogrametría en una playa. a) Área muestreada; b) Acercamiento a playa y modelo digital 3D (tomada de Turner et al., 2016).

2.5. LIDAR

Se puede realizar altimetría láser utilizando un vehículo volador equipado con un sensor LIDAR (*Light Detection and Ranging*), que resulta un método alternativo útil para obtener información topográfica para dunas costeras y zonas intermareales. LIDAR mide la dirección y el tiempo de propagación de pulsos de láser, y con ello calcula distancias (Fig. 17). Es posible utilizarlo desde un vehículo volador y medir la distancia hacia el suelo, utilizando un sistema multisensor completamente digital que puede incluir un sistema de posicionamiento global GPS, sistema de navegación inercial y el sensor láser como lo hacen Saye et al. (2005). Mencionan que típicamente el error para un sistema LIDAR es de 5 cm y un error vertical promedio de 15 cm. Un posicionamiento impreciso por GPS del vehículo aéreo puede llevar a errores en geo-referencia, además que los datos obtenidos pueden verse afectados por varias interferencias. Reportan que el error en el procesamiento de los datos incrementa si hay presencia de vegetación. Se ha obtenido una precisión en datos procesados de LIDAR de 5 cm en terreno abierto y de hasta 20 cm en zona boscosa.



Figura 17. Se mide la distancia al suelo desde un vehículo aéreo posicionado por GPS (tomada de <https://www.sanborn.com/lidar-operating-principles>).

2.6. Perfilación de la zona de rompiente

Los perfiles de playa se pueden complementar con datos más allá de la línea de costa, incluida la zona de rompiente del oleaje. Se ha medido con diferentes estrategias que van desde procesamiento de imágenes, mediciones desde vehículos acuáticos superficiales hasta vehículos anfibios de gran tamaño.

2.6.1. Procesamiento de imágenes y análisis de píxeles

Stockdon & Holman (2000) desarrollaron una técnica de teledetección basada en el procesamiento de imágenes de vídeo para estimar la batimetría costera, a partir de una serie de imágenes tomadas en intervalos de una hora. La propagación de las olas hacia la costa se mide utilizando series de tiempo de intensidad de píxeles recopiladas en una serie de ubicaciones a través de la costa utilizando cámaras de video operadas a distancia. La técnica se probó utilizando 30 días de datos recopilados. Los errores calculados como la diferencia entre la profundidad estimada y los datos reales del suelo muestran un sesgo medio de -35 cm (error rms = 91 cm).

2.6.2. Moto acuática con ecosonda

Otra técnica que ha sido utilizada es una moto acuática equipada con un ecosonda y diversos componentes electrónicos como describe Côté (1999). La posición del equipo perfilador se medía utilizando un Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) y podía trabajar con oleaje de hasta 3 m de altura y en profundidades de 1-15 m. El efecto del oleaje y mares se eliminaba al procesar los datos de profundidad y posición. Esta técnica tiene la limitante de no poder medir en la zona cercana a la línea de costa, por lo que no se tendría un perfil continuo desde la playa, es muy similar a una batimetría.

2.6.3. Vehículos Remotamente Operados

Otro tipo de método de perfilación es el uso de Vehículos Remotamente Operados (ROV), que pueden ser anfibios y operar en la zona cercana a la costa para tomar datos y hacer observaciones en la zona de rompiente. Diversos vehículos son reportados por Tee (2013), estos son tetraedros de gran tamaño, uno de ellos de 9 m de ancho y 10 m de alto, que se desplaza con neumáticos y mecanismos hidráulicos, así como con un motor montado en la parte superior. Sin embargo, esta tecnología de 8.2 toneladas está críticamente limitada por su flexibilidad para ser transportada y para acceder a las áreas de prueba (Tee, 2013; Birkemeier & Mason, 1984).

Otro de los descritos es un ROV más viable para operar en la zona de rompientes, denominado *Surf Rover*, que resuelve el problema de movilidad en los diferentes tipos de suelo y el acceso a los mismos. El Surf Rover (Fig. 18) está formado por un marco estructural, dos brazos frontales y ruedas tipo oruga, un contenedor hermético que contiene la energía, hidráulica y equipo de control, así como una rueda en la cola. Mide 5.2 m de ancho, 6.7 m de largo y su peso seco es de 1.36 toneladas (Dally et al. 1994).

2.6.4. Robot anfibio con patas

Tanaka et al. (2007) presentaron un sistema topográfico automatizado con un robot anfibio con patas para zonas costeras. Un poste con un prisma se coloca sobre el robot para ser desplazado a lo largo de la ruta de perfilación, de modo que sea visible por encima del nivel del mar y de esta forma poder utilizar el equipo topográfico desde tierra para obtener el perfil, al mismo tiempo que los datos son guardados en una computadora local (Fig. 19).

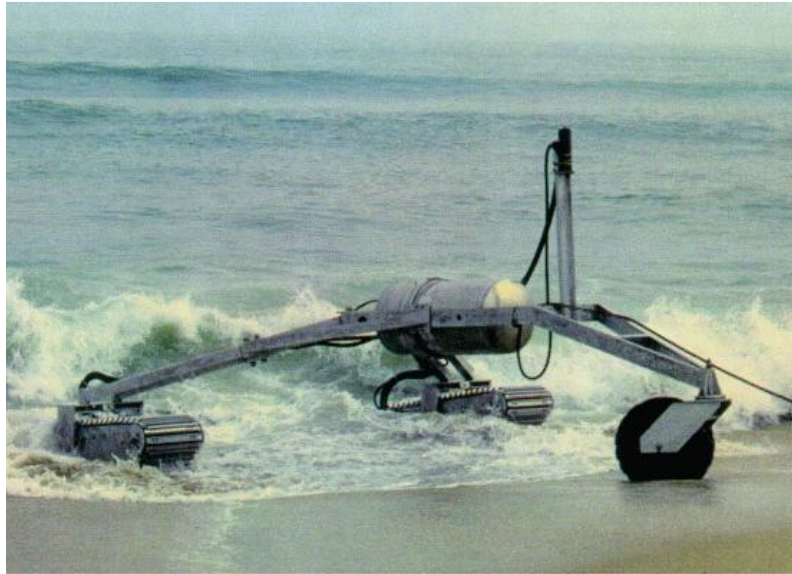


Figura 18. Vehículo remotamente operado, *Surf Rover* (tomada de Tee, 2013).

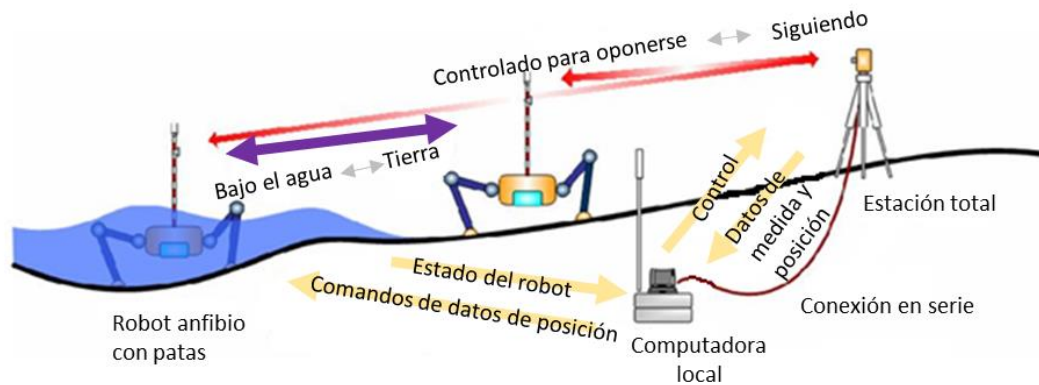


Figura 19. Robot anfibio con patas para topografía (modificada de Tanaka et al., 2007).

3. Justificación

Se propone el desarrollo de un equipo para generar perfiles de playa y en la zona submarina cercana a la costa donde se dificulta su estudio debido al riesgo provocado por el fuerte oleaje, que sea capaz de medir hasta la zona de rompiente del oleaje, donde no sea posible realizar batimetría.

Con los métodos de perfilación manuales y topográficos anteriormente descritos, se pueden generar los perfiles de playa y podrían incluso utilizarse para medir dentro del mar en la zona de rompiente del oleaje siempre y cuando la fuerza del mismo oleaje lo permita. En todo caso, se requiere que al menos una persona ingrese al mar con la protección necesaria e intente realizar la medición. El caso del equipo GPS, se dificulta debido a que los componentes electrónicos no se

deben mojar. Con altimetría o fotogrametría, se complica la medición de la morfología por debajo del agua.

Existen instrumentos experimentales que son costosos y pesados, normalmente montados en vehículos que presentan problemas de movilidad y transportación utilizados en lugares muy específicos. Otra de sus limitantes es de requerir varias personas para ser operados además del peligro que implica su uso.

En este trabajo se muestra el desarrollo de una plataforma automatizada portátil para medir el perfil en playa y zona de rompiente (Fig. 20).

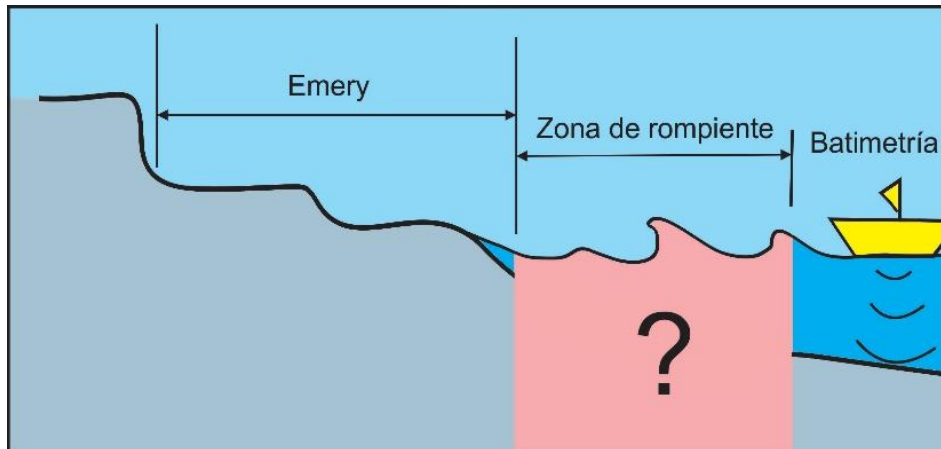


Figura 20. Planteamiento del problema.

4. Hipótesis

Las playas expuestas al Océano Pacífico en la zona sur de Baja California Sur son de alta energía con cambios intensos de su morfología a lo largo del año y su perfil topográfico incluida la zona de rompiente, puede medirse con un vehículo automatizado con sensores *ad hoc*.

5. Objetivo

Generar y validar un dispositivo automatizado capaz de medir el perfil de playa y de la zona de rompiente en playas de Baja California Sur.

6. Área de estudio

Diversas playas en la zona sur de la Península de Baja California se utilizaron como área de estudio, en particular en el estado de Baja California Sur, México (Fig. 21).

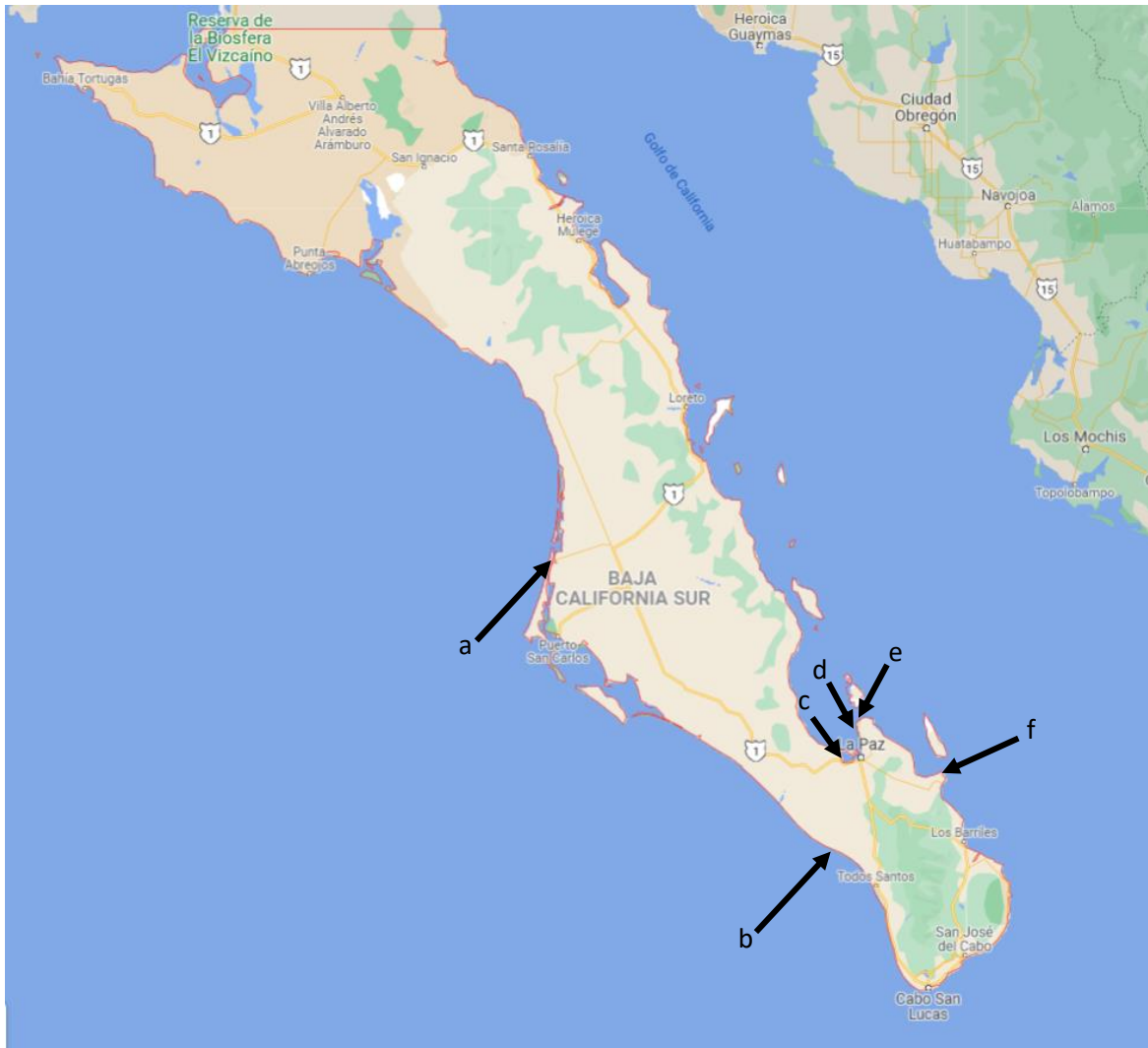


Figura 21. Playas en Baja California Sur elegidas como zona de estudio (mapa tomado de Google Maps). (a) Puerto Adolfo López Mateos; (b) Agua Blanca; (c) El Comitán; (d) Balandra; (e) El Tecolote; (f) Punta Arenas.

6.1. Puerto Adolfo López Mateos

Ubicado en el municipio de Comondú, Baja California Sur, el Puerto Adolfo López Mateos (25° 11.676' N 112° 07.428' W) se encuentra a aproximadamente 63 km al noroeste de Ciudad Constitución y 28 kilómetros de Puerto San Carlos, en la zona norte de Bahía Magdalena, es referente por ser frecuentado en invierno por ballenas, donde completan su ciclo reproductivo. Está protegido por la isla Magdalena al oeste, que presenta playa y zona de duna en partes de su línea de costa (Fig. 21a).

La zona marina adyacente a este puerto, denominada Canal de Santo Domingo, forma parte del sistema lagunar conocido como Bahía Magdalena-Bahía Almejas. Este canal queda separado del mar por un estrecho cordón litoral formado principalmente por dunas de arena muy fina (Paredes-Lozano, 2016). La playa utilizada para pruebas se encuentra sobre esta sección de dunas, del lado del canal y al sur del puerto.

6.2. Agua Blanca

La zona de Agua Blanca, Baja California Sur (23° 34.301' N, 110° 20.550' W) está ubicada a 70 km al suroeste de la ciudad de La Paz y a 25 km al noroeste del poblado Todos Santos, la playa es reflexiva y de muy alta energía, al estar expuestas directamente al Océano Pacífico (Fig. 21b). Los ciclones tropicales tienen mayor actividad entre agosto y septiembre, los vientos alisios producen lluvias ocasionales a finales de septiembre. El oleaje está dominado por *swell*, las mareas son mixtas con tendencia a diurna. Se trata de una costa de muy alta energía marina, el oleaje y los vientos son los principales modeladores de la línea de costa (Lira-Beltrán, 2009).

6.3. El Comitán

Se ubica a 14 km de la ciudad de La Paz, Baja California Sur (24° 7.933' N, 110° 25.133' W), la playa es protegida por encontrarse en la zona oeste de la Laguna de La Paz (Fig. 21c), presenta niveles altos de materia orgánica, el sustrato es arenoso con zonas de lodo. El tipo de mareas en la zona es mixto, con predominancia de tipo semidiurna (Rodríguez-Meza, 1999).

6.4. Balandra

Balandra es una playa de bolsillo (24° 19.366' N, 110° 19.683' W), delimitada por dos salientes rocosas, está compuesta por sedimentos carbonatados, está protegida del oleaje directo por encontrarse al interior de caletas limitadas por puntas rocosas, presenta dunas bien desarrolladas y con vegetación costera abundante (Fig. 21d). Las mareas en la bahía de La Paz son mixtas con tendencia semidiurnas. Se ubica a 20 km al norte de la ciudad de La Paz, en Baja California Sur (Romero-González, 2018).

6.5. El Tecolote

La Playa El Tecolote ($24^{\circ} 20.233' N$, $110^{\circ} 18.800' W$) se localiza a 22 km al norte de la ciudad de La Paz, Baja California Sur (Fig. 21e), en el sur del Canal de San Lorenzo, el cual separa a la isla Espíritu Santo y conecta el sur de la Bahía de La Paz con el Golfo de California (García-Ríos & Álvarez-Ruiz, 2007).

Es una playa larga, arenosa de sedimentos carbonatados, presenta un comportamiento disipativo y está expuesta al oleaje del norte, se localiza en la región sureste de la Bahía de La Paz (Angeloni del Castillo, 2003).

6.6. Punta Arenas

La playa Punta Arenas ($24^{\circ} 3.550' N$, $109^{\circ} 50.000' W$) se ubica a 60 km al sureste de la ciudad de La Paz, B.C.S., en la delegación de San Juan de Los Planes (Fig. 21f). La playa está compuesta por arena de grado fino a grueso, con pendiente suave a levemente inclinada, con algunas interrupciones rocosas y existen dunas paralelas a la línea de costa. Se encuentra expuesta al viento y oleaje, propensa a cambios significativos durante temporada de huracanes y tormentas (Armenta-Martinez, 2018).

7. Materiales y Métodos

Para obtener un perfil de playa se requiere conocer la variación de altura o profundidad con respecto a su distancia desde un punto fijo, a lo largo de una línea perpendicular a la línea de costa. En este trabajo se calculan estos datos a partir de las mediciones de inclinación, posición y profundidad, todo incorporado en un vehículo capaz de desplazarse perpendicularmente a la playa y zona de rompiente.

La medición inicia desde la playa con el vehículo orientado hacia el mar, perpendicular a la línea de costa. Con una computadora portátil y un dispositivo de comunicación inalámbrica se tiene de forma remota el control del sistema, con la posibilidad de indicar cuando iniciar o detener el avance del equipo. Mientras el dispositivo avanza hacia el mar, los sensores abordo van tomando mediciones que a su vez son guardadas para su procesamiento posterior (Fig. 22).

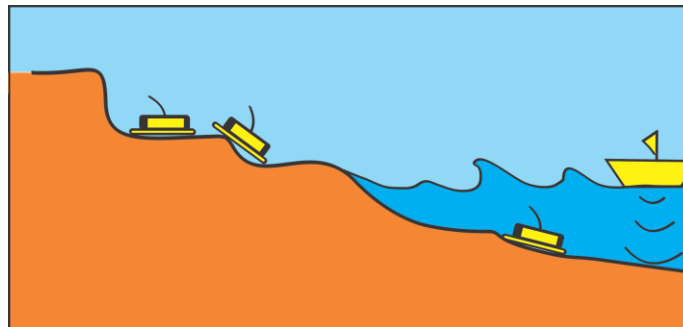


Figura 22. Procedimiento para realizar la medición con el vehículo automatizado.

Se cuenta con un sistema de recuperación a través de un cabo, que funciona como sistema de seguridad en caso de presentarse una falla o un atascamiento. A su vez, es un mecanismo utilizado para medir la distancia desplazada por el vehículo que sirve como complemento al momento de calcular el perfil de playa.

7.1. Principio de operación

Para calcular la elevación a partir de la inclinación y distancia se tiene que considerar el modo en que se midió la distancia, ya sea de forma horizontal (Fig. 23a) o tomando la forma de la pendiente (Fig. 23b), para cada caso se tendría que calcular de manera diferente. Para calcular a partir de la distancia horizontal entre las mediciones, donde A es la altura del desnivel entre dos puntos, β es el ángulo calculado y d_H es la distancia horizontal medida:

$$A = \tan(\beta) \cdot d_H \quad (2)$$

En el caso que la medición de distancia se realice siguiendo la superficie del suelo d , se deberá utilizar la Ecuación 3.

$$A = \text{sen}(\beta) \cdot d \quad (3)$$

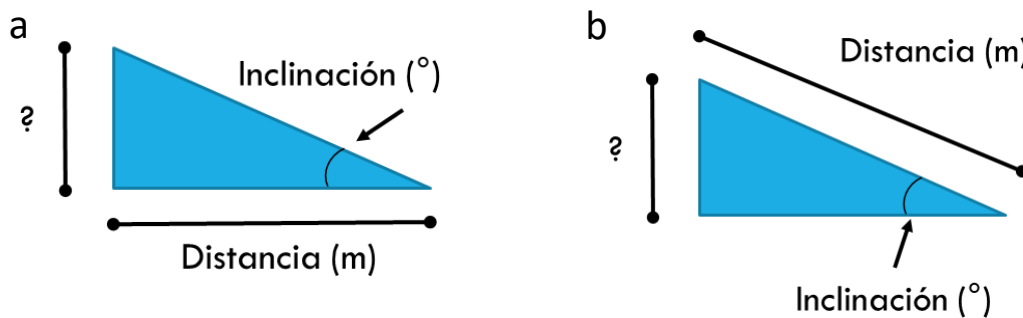


Figura 23. Modos en que se puede medir la distancia entre puntos. (a) Horizontal; (b) Inclinada.

Una vez que se tienen calculadas las elevaciones y se tiene la distancia entre ellas, se procede a generar el perfil de la misma forma que con otros métodos como el de Emery. Para ello se tienen que acumular tanto las elevaciones como las distancias horizontales entre puntos. Si se tomaron medidas horizontales, simplemente se suman, en caso contrario, se tendrán que convertir a distancias horizontales para evitar un error en la formación del perfil. Esto se puede realizar de diferentes maneras, una opción es partir del ángulo de inclinación de la pendiente y la elevación en ese segmento y entonces:

$$d_H = A / \tan(\beta) \quad (4)$$

Donde d_H será la distancia horizontal, A la elevación y β el ángulo de la pendiente.

Si no se cuenta con el ángulo de la pendiente, pero se cuenta con la elevación A y la distancia a lo largo de la pendiente, se puede obtener con:

$$\text{sen}(\beta) = A/d \quad (5)$$

Y si se desea obtener directamente la distancia horizontal d_H a partir de la distancia a lo largo de la pendiente d y la elevación A , se debe utilizar:

$$d_H = A/\tan(\text{sen}^{-1}(A/d)) \quad (6)$$

Ya con los datos de distancia horizontal y elevación se pueden colocar de la siguiente manera para graficar:

Tabla 1. Ejemplo de organización de datos de elevación y distancia para graficar perfiles

Segmento #	Distancia horizontal (x)	Distancia horizontal acumulada (x)	Elevación del segmento (y)	Elevación acumulada (y)
1	0	0	0	0
2	6.8	6.8	0.45	0.45
3	3.51	10.31	-0.35	0.1
4	2.25	12.56	-0.61	-0.51
5	8.15	20.71	-1.15	-1.66

Para obtener el perfil en una gráfica, se utilizan las columnas de distancia horizontal acumulada y elevación acumulada, entonces se genera una gráfica X, Y como se muestra en la Figura 24:

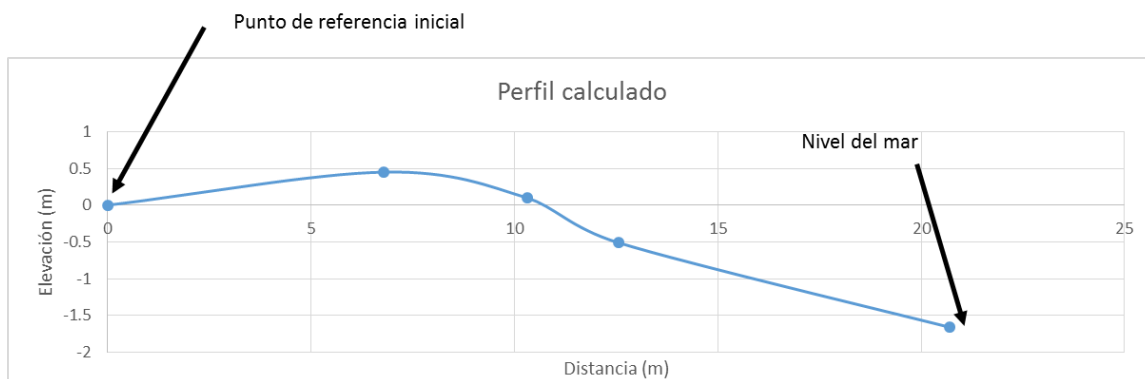


Figura 24. Gráfica con los valores acumulados de distancia horizontal y elevación (Perfil).

Si la distancia se intenta obtener a partir de un GPS, cuyo dato entregado es latitud (norte-sur) y longitud (este-oeste), se tiene que calcular la distancia horizontal. Existen métodos como la fórmula de Haversine (Dauni et al. 2019) para calcular la distancia entre dos puntos considerando la forma

de esferoide de la tierra, o para distancias cortas, se puede utilizar una aproximación simple como la fórmula para calcular la distancia Euclidiana entre dos puntos:

$$d_E(P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (7)$$

Donde d_E es la distancia entre los dos puntos, P_1 y P_2 son los puntos formados por (x_1, y_1) y (x_2, y_2) respectivamente.

Si la latitud y longitud está representada en formato grados y minutos, se tiene que unificar, ya sea a solo grados o solo minutos.

$$g_f = g + (m/60) \quad (8)$$

$$m_g = (g \cdot 60) + m \quad (9)$$

Donde g_f serán los grados con fracción incluyendo los minutos, g son los grados enteros ya sea en latitud o longitud y m la parte en minutos de latitud o longitud. Mientras que m_g serán los minutos integrando los grados.

En el ecuador (latitud 0°), un grado en latitud y un grado en longitud son aproximadamente iguales.

Un minuto en latitud, equivale a 1 milla náutica, igual a 1,852 m, por lo que un grado en latitud será igual a $60 \cdot 1852 \text{ m} = 111,120 \text{ m}$. Para convertir a metros el resultado de distancia logrado con la ecuación 7, se debe entonces multiplicar según corresponda por 1,852 o 111,120 si se utilizaron minutos o grados respectivamente.

En el caso de la longitud, la distancia que representa cada grado cambia conforme se aleja del ecuador, partiendo desde 111,321 m cercano al ecuador, y disminuir hasta 55,802 m a 60 grados en latitud, por ejemplo. Si se desea considerar esta corrección, se puede utilizar una ecuación sencilla para ajustar los valores de longitud:

$$l_m = R \cdot \cos(\theta) \cdot \tan(\varphi) \quad (10)$$

Donde l_m representa la distancia en metros equivalente a 1 grado en longitud a partir de la latitud θ representada en radianes, mientras que $\varphi = 0.017453293$ sería el equivalente a 1 grado en longitud representado en radianes. $R = 6371,000$ se puede utilizar como el radio de la tierra representado en metros.

Aplicando esta fórmula para la ciudad de La Paz, Baja California Sur a 24.14° en latitud, cada grado en longitud equivale a 101,481 m y a manera de ejemplo, para la ciudad de Loreto, Baja California Sur a una latitud de 26.01° cada grado en longitud equivale a 99,942 m.

La latitud va de -90° a 90° donde el 0° representa el Ecuador. Valores positivos indican latitud Norte y negativos latitud Sur. En el caso de la longitud, los valores van de -180° a 180° donde la longitud 0° corresponde al meridiano de Greenwich. Los valores negativos indican longitud Oeste y los positivos longitud Este. Aunque las referencias geográficas se dan en la forma (latitud, longitud) en

formato de grados, minutos y segundos. Sin embargo, al realizar cálculos matemáticos y programar los dispositivos se usó en forma (longitud, latitud) en formato decimal.

Existe otro sistema de coordenadas llamado UTM (*Universal Transverse Mercator*) que considera el planeta como un mapa cuadrulado dividido en zonas y bandas, cuyos valores están representados en metros. Es posible realizar conversiones entre el sistema de coordenadas UTM y GPS con valores en latitud y longitud, por lo que dependerá del instrumento que se utilice.

7.2. Perfilador electrónico

Un método utilizando componentes electrónicos, en particular un acelerómetro y un GPS que se colocaron sobre un vehículo terrestre y al sistema en conjunto se le denominó WBP (*Wireless Beach Profiler*). El acelerómetro colocado de forma vertical se utilizó para medir inclinación, donde la fuerza de gravedad se utiliza como entrada para definir la pendiente de un plano. La salida del acelerómetro se considera proporcional al ángulo de la pendiente. Se midieron varios puntos a lo largo de una línea perpendicular a la línea de costa para generar el perfil (Gutiérrez et al., 2012).

7.3. Perfilador electrónico para playa y zona submarina

Se describe el diseño y desarrollo de un sistema para perfilar la zona submarina cercana a la línea de costa que incluya la zona de rompiente de olas. Actualmente se cuenta con poca información sobre la morfología submarina en playas de Baja California Sur debido a lo intenso del oleaje.

7.3.1. Prueba de concepto

Se propone una modificación al método del nivel de mano Abney con el que se realizan perfiles de playa por medio de inclinación, para hacerlo ahora a partir de un acelerómetro y realizar perfiles en playa y en la zona submarina cercana a la costa. Se propone el desarrollo de un equipo hermético que pueda ser deslizado por la superficie del fondo marino mientras registra de forma continua las diferencias de inclinación. El parámetro restante para lograr la generación del perfil es la distancia entre puntos. En esta prueba de concepto, se decidió implementar una práctica solución que consiste en sujetar el dispositivo medidor de inclinación a un cabo lo suficientemente largo para permitir introducir el equipo al mar y después extraerlo, mientras se registra la distancia (Fig. 25).



Figura 25. Equipo hermético con sensores de inclinación siendo recobrado con un cabo.

Se construyó un contenedor hermético de metal (Fig. 26) dentro del cual se colocó el sensor inercial para medir y registrar la inclinación de forma continua. Este contenedor se montó sobre una placa de metal de aproximadamente 40 cm de largo para facilitar su deslizamiento por el suelo arenoso del mar. El cabo que se utiliza tanto para medir la distancia entre una referencia fija y el inclinómetro se recobra a través de un carrete especialmente desarrollado para ello.

El material requerido para realizar el perfil de playa con este método es: inclinómetro electrónico de registro continuo, carrete con cabo de 40 metros, cinta métrica, pala, computadora para procesar los datos y transporte para introducir el equipo al mar.



Figura 26. Contenedor hermético para proteger inclinómetro.

7.3.2. Metodología para realizar el muestreo

El proceso comienza por instalar el carrete en un punto que sirva de base para identificar el perfil. Se procede a enterrar unos centímetros la base de la estructura que sujeta el carrete, asegurándose de que quede en dirección al mar. Después se enciende el equipo a través del interruptor dentro del cilindro metálico, por lo que se requerirá retirar y volver a colocar la tapa de metal y las tuercas que lo sujetan. Una vez encendido el equipo, comienza el registro de los datos (fecha, hora e inclinación). El siguiente paso es fijar el equipo medidor al extremo del cabo con el gancho instalado para ello.

Uno de los inconvenientes para esta prueba de concepto es introducirlo al mar a la distancia deseada, que será el largo del perfil. En estas pruebas se utilizó un largo de cabo de 40 m. Se requiere entonces, apoyo de transporte para introducirlo al mar, como puede ser una lancha. Se lleva el equipo a la distancia deseada y entonces se suelta al mar y por gravedad caerá al fondo. En ese momento se procede a recobrar desde la orilla por medio del carrete y cabo.

Se deja el equipo 5 segundos aproximadamente sin moverse para permitir que se logre un registro estable de la inclinación del fondo marino, y entonces se recobra 1 metro desde la orilla. La distancia recorrida puede ser medida con la cinta métrica. Se deja detenido de nuevo 5 segundos y se repite el procedimiento de recobrar 1 metro y esperar, hasta que el equipo sea extraído del mar y recorra la zona de playa que se desea medir.

Los datos registrados en los circuitos son leídos de forma inalámbrica con la ayuda de una computadora y se pueden visualizar ya sea en una hoja de cálculo o en un software como MATLAB. Del archivo resultante se pueden obtener las inclinaciones a lo largo del perfil y la distancia es conocida, en este caso 1 metro entre un dato y otro. Con estos dos parámetros el perfil puede ser generado si se sigue el procedimiento descrito en la sección anterior. Este procedimiento se realizó en playas del puerto Adolfo López Mateos y Balandra.

7.3.3. Interpretación de datos

El registro que se obtiene del muestreo es de inclinaciones y el tiempo en que fueron tomadas, se conoce además que se hicieron pausas de 5 segundos cada metro recorrido, por lo que al momento de graficar los valores registrados es posible identificar estas variaciones.

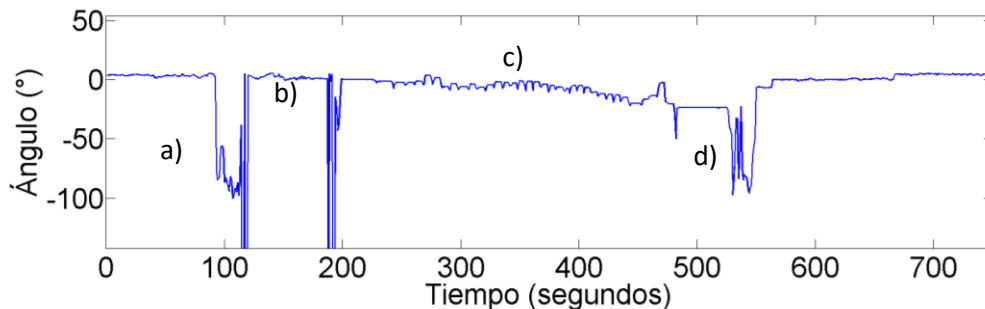


Figura 27. Datos de inclinación sin procesar con respecto al tiempo.

Si la inclinación es igual a 0, corresponde al equipo en posición horizontal. Se pueden apreciar tres momentos en el registro donde se observa que el equipo es manipulado y por lo tanto lo representa con cambios en inclinación, por ejemplo, al subir y bajar de la lancha (Fig. 27a y 27b), o cuando se recupera en la orilla (Fig. 27d). Se pueden apreciar en la mitad de la gráfica cambios ligeros en inclinación, que corresponden al recorrido que se realizó desde el momento en que entró al mar y hasta que llegó a la orilla registrando la forma del fondo (Fig. 27c).

Los datos de interés son los correspondientes a la inclinación que se obtiene durante el recorrido por el fondo marino, al realizar un acercamiento a estos se identifican una serie de crestas y cambios de inclinación abruptos.

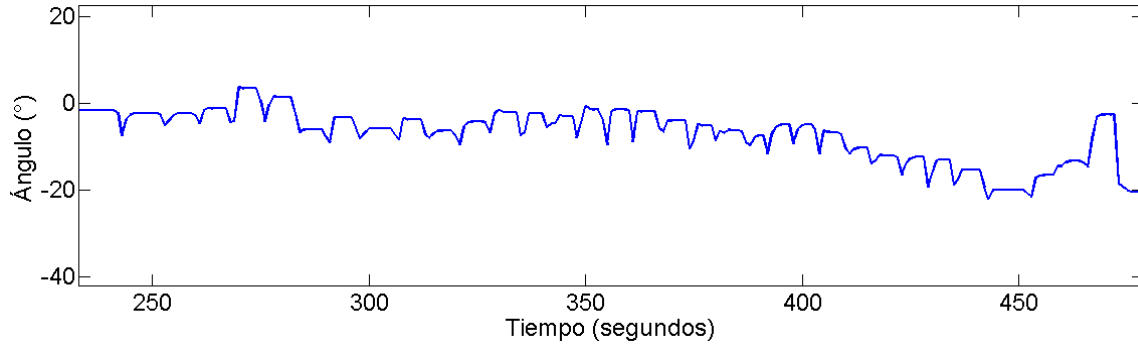


Figura 28. Inclinaciones obtenidas de la prueba (Puerto Adolfo López Mateos).

En la medición realizada en el puerto Adolfo López Mateos, se recorrió una distancia de 35 m por el fondo del mar, que corresponde con 35 escalones que se pueden apreciar en la Figura 28. Cada uno de los planos en los pulsos cuadrados, es el tiempo de espera que se tomó antes de cada desplazamiento. El cambio descendente que se observa entre escalones se debe al cambio repentino al recobrar el cabo.

Se debe de obtener un valor de inclinación por cada escalón, que relacionado con la distancia conocida (1 m) se podrá utilizar para generar el perfil. En la Figura 29 se muestra el recorrido del inclinómetro por el fondo del mar en la playa Balandra.

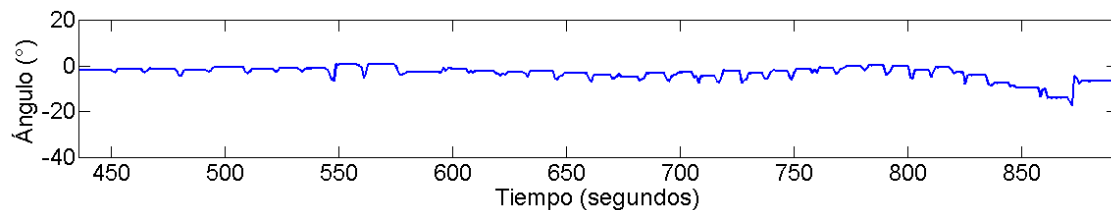


Figura 29. Inclinaciones obtenidas de la prueba (playa Balandra, La Paz, BCS).

En este punto, ya se tendrían datos de inclinación y distancia entre puntos, a partir de los cuales se puede aplicar el procedimiento descrito para generar el perfil utilizando las ecuaciones 2 y 3, y el ejemplo descrito en la Tabla (1).

El perfil generado tanto en la playa del puerto Adolfo López Mateos como en la playa Balandra fueron comparados con la batimetría realizada con la misma lancha que se utilizó para introducir al mar el equipo, y se recorrió la misma zona, sólo que con batimetría no es posible medir la zona próxima a la orilla.

Debido al oleaje presentado al momento de realizar la batimetría en la playa del puerto Adolfo López Mateos, algunos datos presentaron mediciones inexactas porque el transductor de la ecosonda salió del agua (Fig. 30).

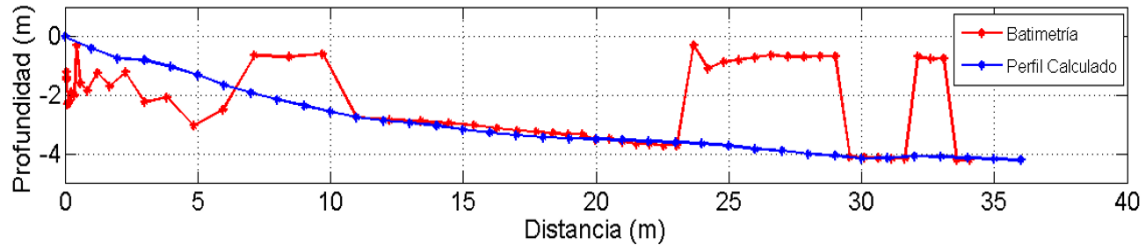
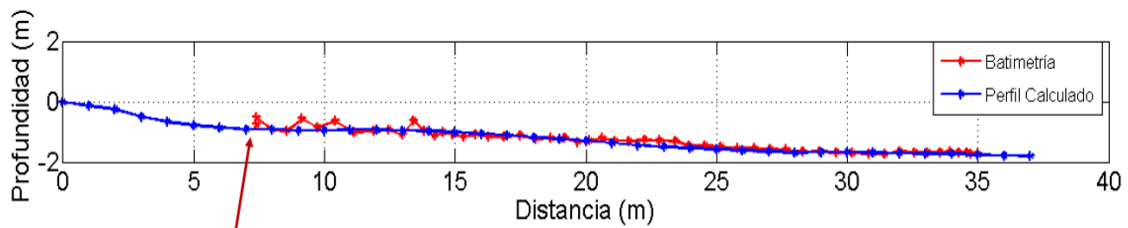


Figura 30. Comparación del perfil generado con el inclinómetro y batimetría en Puerto Adolfo López Mateos, B.C.S.

De la misma forma se realizó una prueba en playa Balandra con los siguientes resultados (Fig. 31):



Hasta este punto se pudo realizar batimetría

Figura 31. Perfil generado con inclinómetro vs batimetría en playa Balandra, B.C.S.

7.3.4. Prototipo preliminar

Se trabajó en el diseño de una estructura de mayor tamaño que pudiera soportar un oleaje de intensidad moderada y se probó en playas de Agua Blanca. (Fig. 32)



Figura 32. Pruebas de diseño en playas de Agua Blanca, B.C.S.

Después se procedió a incorporar un sistema de locomoción con base en un propulsor formado por paletas que al rotar y mantener un contacto con el suelo logra el empuje. Esta mejora fue probada inicialmente en la playa El Comitán, donde se evaluó además su desempeño dentro del mar (Fig. 33).



Figura 33. Pruebas de sistema de locomoción en playa El Comitán, prototipo preliminar.

Este prototipo preliminar se diseñó para utilizar únicamente un motor propulsor y no le permitía dar vuelta, solo realizar movimientos hacia adelante y hacia atrás. Se complementó con los sensores necesarios para medir y generar perfiles de playa (Fig. 34), incluyendo sensores inerciales, una minicomputadora, un odómetro, comunicación inalámbrica, sensor de profundidad, así como su controlador para motor como se señalan en la Figura 35.



Figura 34. Prototipo preliminar, incorpora sensores.

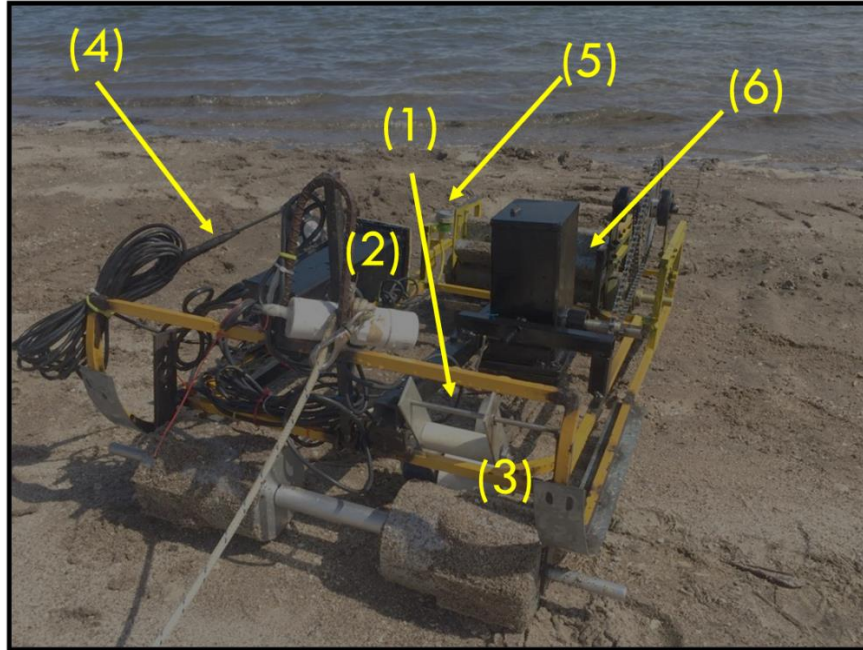


Figura 35. (1) Sensores Inerciales y Magnético; (2) Computadora a bordo; (3) Odómetro; (4) Comunicación Inalámbrica; (5) Sensores de profundidad; (6) Sistema de tracción controlable.

7.4. Desarrollo de perfilador subacuático de oruga

El desarrollo del perfilador subacuático de oruga (PSO), llamado así por las ruedas tipo oruga que se incorporaron para lograr la tracción adecuada en zona de sedimento no consolidado, y que además permiten al prototipo realizar giros. Este prototipo permite perfilar la playa y la zona costera utilizando los datos de inclinación y posición obtenidos de un acelerómetro electrónico y un receptor GPS, respectivamente. El principio de perfilado se basa en mediciones con sensores inerciales en una trayectoria determinada a lo largo de esta zona costera; a diferencia de las técnicas típicas de perfilado de playas que utilizan óptica o visión. El prototipo de PSO fue probado en una zona que no es apta para ser perfilada mediante batimetría o mediciones manuales. El sistema se ha construido utilizando repuestos comunes y prácticos de bajo costo.

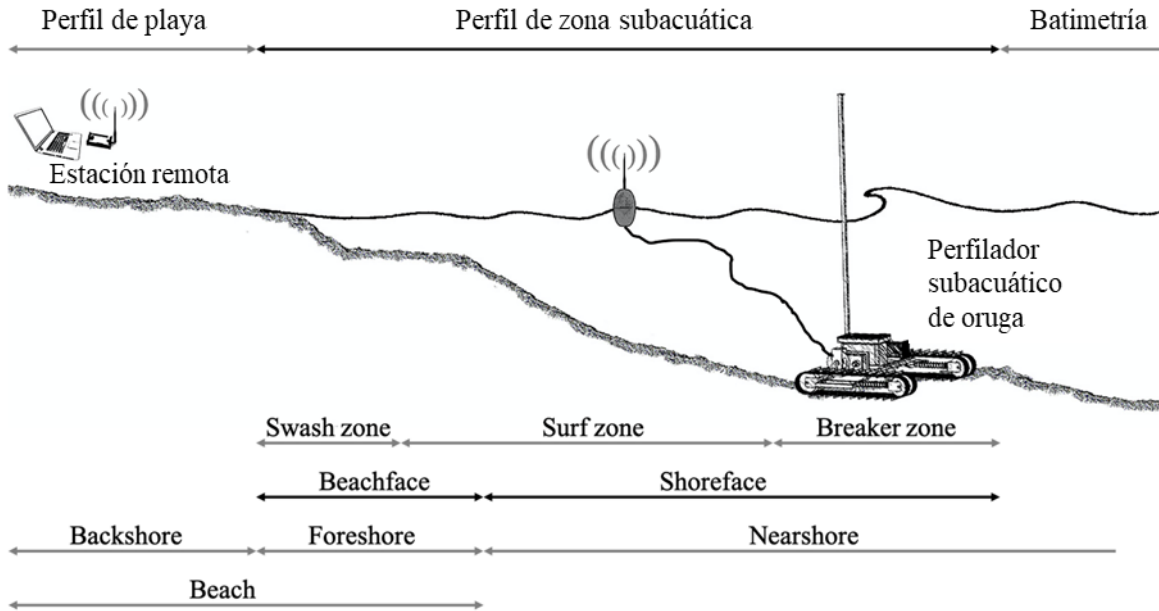


Figura 36. Sistema perfilador (las diferentes secciones se describen con su nombre en inglés).

El perfilador consta además del vehículo subacuático de oruga, de una estación remota (Fig. 36). El sistema está diseñado para operar entre la playa y la zona de rompiente del oleaje. La tarea de perfilado más allá de la zona de rompiente se puede realizar con métodos de batimetría, utilizando vehículos marinos autónomos (Bernalte-Sánchez et al., 2020; Madeo et al., 2020). Este prototipo perfilador se utiliza para completar los datos de morfología de playa, lo que permite la delimitación del litoral. Además, se incluye un sensor de presión para estimar el nivel del mar instantáneo.

7.4.1. Vehículo subacuático de oruga

El vehículo cuenta con un chasis rectangular de 40 cm x 50 cm fabricado con PTR de sección cuadrada de 2.54 cm montado sobre dos orugas de acero inoxidable y bandas de goma (Fig. 37). Cada oruga es impulsada por un motor para ventana de automóvil de 12 V, que está encapsulado en una caja metálica impermeable, llena de aceite mineral para aumentar la transferencia de calor y conectado a una transmisión de engranaje y cadena de 2.6:1 de relación. Las bandas se tensan con un amortiguador de resorte helicoidal sostenido por un piñón de transmisión trasero y uno de giro libre en la parte delantera. El vehículo tipo oruga tiene 1.0 m de largo, 1.3 m de ancho y 0.5 m de altura. Está fabricado con 30 eslabones de acero inoxidable de 0.18 m para formar la oruga (Fig. 38) y tiene un peso total de 80 kg. Este vehículo de orugas cuenta con locomoción versátil que puede operar en diversos terrenos, generando baja presión sobre el suelo y evitando que se hunda en terrenos blandos, como terrenos arenosos sueltos (Hornback, 1998; Hetherington, 2005; Wong & Huang, 2006).

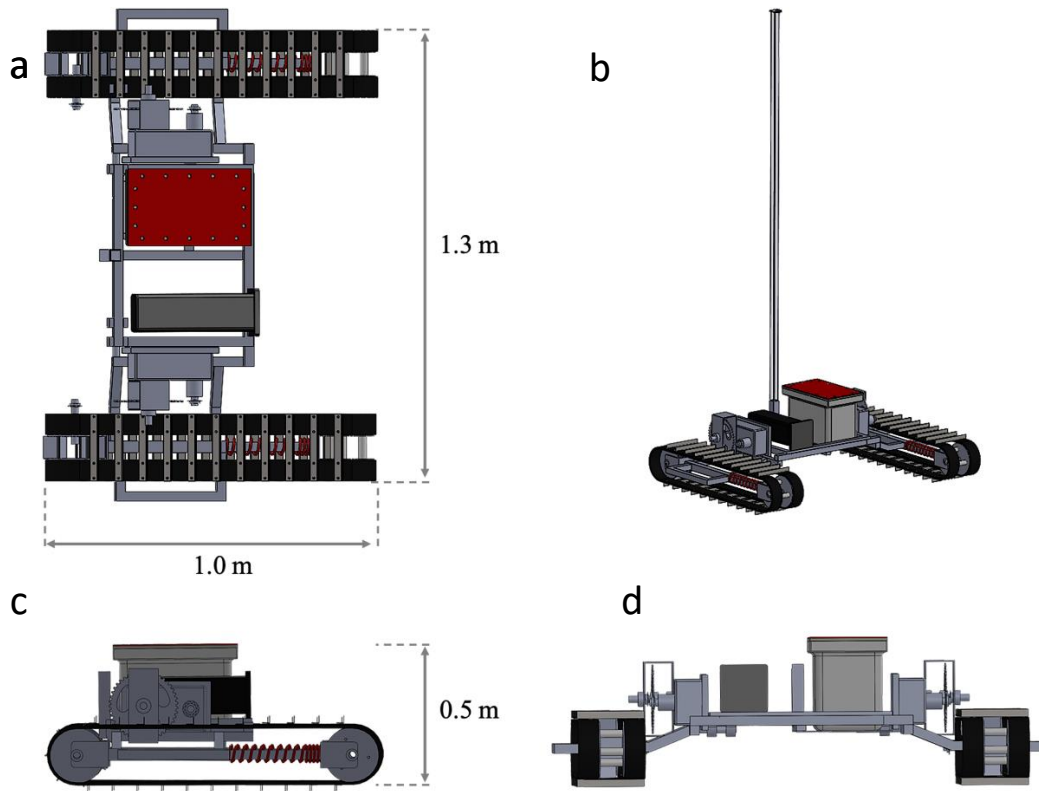


Figura 37. Diseño del vehículo subacuático perfilador de oruga. (a) vista superior; (b) vista isométrica; (c) vista lateral; (d) vista frontal.

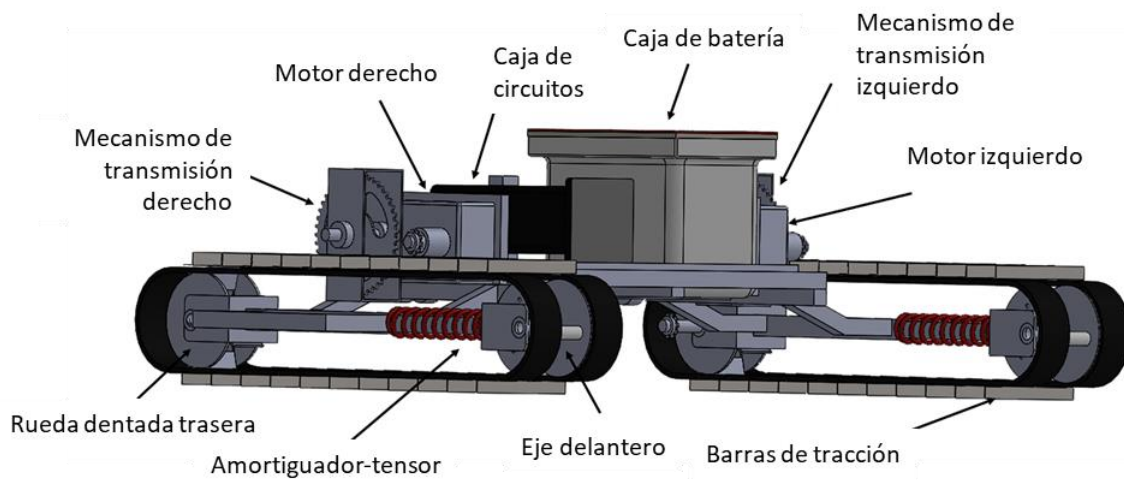


Figura 38. Componentes principales que ensamblan al vehículo subacuático perfilador.

Se utilizan dos cajas metálicas herméticas, una para contener los circuitos electrónicos y la otra para resguardar una batería recargable de ciclo profundo de 12 V y 50 Ah, que alimenta los motores. La caja de circuitos contiene la electrónica necesaria para la comunicación, medición y control (Fig. 39a). La unidad de procesamiento principal incluye una minicomputadora BeagleBone Black, que está conectada a un enlace de comunicación inalámbrica bidireccional a través de un radio módem XBee-PRO XSC S3B, utilizado para transmitir los datos de sensores y recibir comandos de control. Esta minicomputadora recopila datos de inclinación y orientación de una unidad de medición inercial (IMU) BNO055. Además, para medir la profundidad del agua se utiliza un sensor de presión MS5837-30BA con una frecuencia de muestreo de 6 datos por segundo que es suficiente para medir el período y la amplitud de las olas del mar de acuerdo con el Teorema de Nyquist (Landau, 1967).

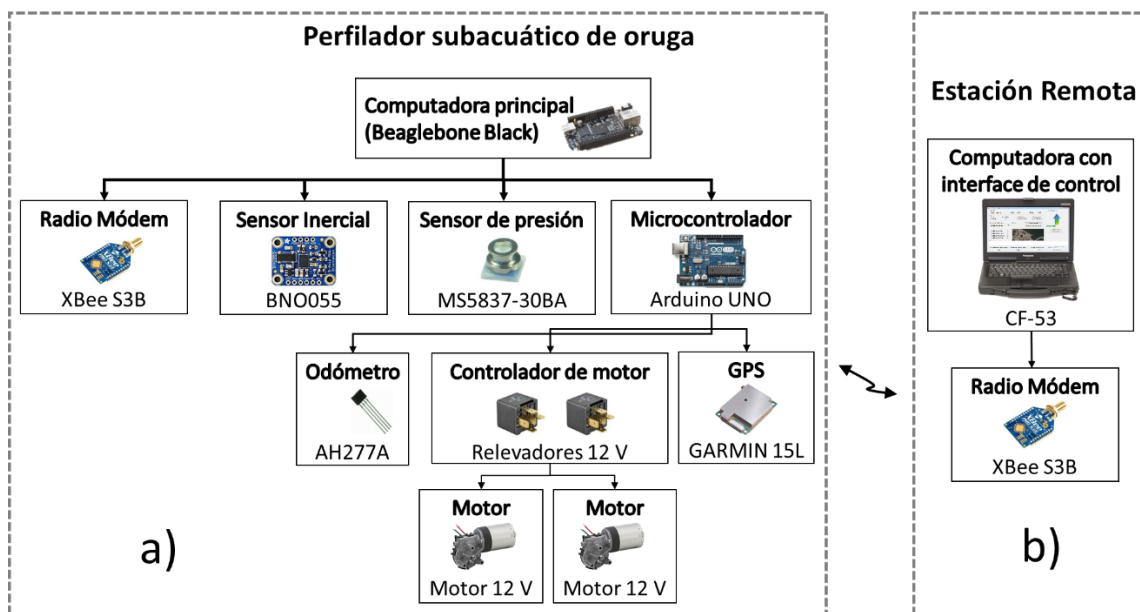


Figura 39. Perfilador subacuático. (a) Partes sumergidas del PSO; (b) Estación remota.

El desarrollo de las ruedas tipo oruga se realizó por etapas para probar el concepto, primero se fabricó uno de los lados, se probó y entonces se fabricó el lado opuesto. Se utilizó lámina de acero inoxidable en forma de paletas que une dos bandas de goma flexibles para dar rigidez permitiendo la rotación de la banda (Fig. 40).



Figura 40. En proceso de desarrollo de las ruedas tipo oruga.

Durante su desarrollo se probaron diferentes configuraciones en el ensamblaje y se experimentó con diferentes materiales para su fabricación incluyendo fibra de vidrio, acero al carbón, y acero inoxidable entre otros (Fig. 41).



Figura 41. Pruebas en Playa El Tecolote, La Paz, B.C.S., con nuevo prototipo.

El BeagleBone está conectado en modo maestro-esclavo a una tarjeta microcontroladora Arduino Uno que adquiere la posición y distancia de un receptor GPS Garmin 15L con una alta antena de ganancia. Un sensor de efecto Hall AH277A conectado como odómetro se utiliza como respaldo para la distancia recorrida. Finalmente, el microcontrolador también maneja un puente H de potencia, diseñado con un conjunto de relevadores y una etapa de optoacopladores, para controlar los motores de las ruedas tipo oruga. Los componentes electrónicos se energizan con un banco de baterías de 5 VCC que se carga inductivamente. La antena GPS se coloca en la parte superior de un mástil extraíble de 2 m, unido a un soporte en el vehículo, para mantenerlo por arriba del nivel del agua.

El odómetro está construido con una rueda dentada de plástico ABS de cinco dientes de 17 cm de diámetro con imanes integrados para ser detectados por el sensor de efecto Hall, ubicado en la parte trasera del vehículo. La IMU y el sensor de presión están encapsulados en un contenedor sellado con epoxi y fijados en el centroide del vehículo. La antena del radio módem se coloca sobre una boya con un cable coaxial de 8 m, lo que permite flotar libremente.

7.4.2. Estación remota

Una computadora portátil de uso rudo Panasonic Toughbook CF-53 con un radio módem XBee-PRO XSC S3B (Fig. 39b) permite la adquisición de datos en tiempo real y control del vehículo dentro de un rango de hasta 6.5 km, con una potencia de transmisión de 250 mW. Una interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada en C# permite un control del vehículo a través de las teclas de flecha. La GUI muestra la hora actual, posición, distancia, orientación, profundidad, inclinación y temperatura del agua (Fig. 42). Además, se incluye un mapa base de la zona de trabajo que se actualiza automáticamente. La velocidad de adquisición y almacenamiento de datos es de 1 Hz para el GPS, 6 Hz para los sensores de presión y de inclinación y 0.2 Hz para el odómetro.

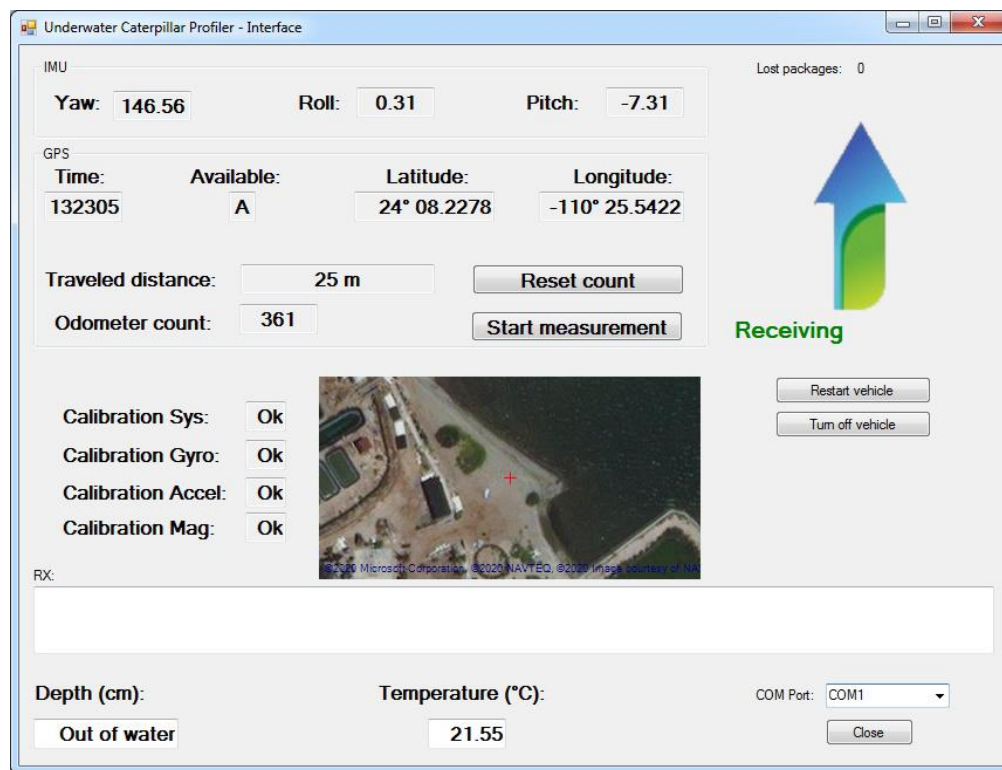


Figura 42. Interfaz gráfica de usuario (GUI) para ver el estado del vehículo.

7.4.3. Algoritmo del Perfilador Subacuático de Oruga

La lógica del software del perfilador está programada en lenguaje Python y se encarga principalmente de recopilar los datos de sensores y controlar los motores de las ruedas tipo oruga. Se ejecuta en la minicomputadora principal bajo el sistema operativo Linux Angstrom. La rutina principal está siempre a la escucha de posibles comandos de control que puedan ser enviados de forma inalámbrica por el usuario desde la estación remota, a través del radio módem.

Se definió un protocolo de comunicación para el envío de comandos formado por 8 bits. Existe un comando para iniciar/detener las mediciones, para controlar los motores o para apagar el sistema, entre otras acciones. Se definió una tabla con los valores que corresponden a cada acción compartida en ambos extremos, tanto en el vehículo perfilador como en la estación remota.

La minicomputadora principal también recopila los datos del sensor inercial y de presión a través del protocolo I²C, mientras que los datos del odómetro y del GPS se adquieren a través del microcontrolador Arduino. Los datos de sensores se transmiten a la estación remota de forma inalámbrica donde se almacenan y se muestran en pantalla. También se crea una copia de seguridad de los datos en la memoria de estado sólido de la minicomputadora principal. Esta rutina está en ejecución continua, repitiendo el proceso de lectura de sensores y atención de comandos remotos.

7.4.4. Medición semiautónoma de perfil

Cuando el usuario presiona el botón de inicio en la GUI, se genera y envía hacia el vehículo perfilador el comando correspondiente para iniciar medición, la minicomputadora registra la hora en que se recibió el comando e inicia un movimiento hacia adelante, ejecutando una rutina programada que permite mantener el rumbo de una forma semiautónoma. Esta rutina mide la orientación del vehículo a partir de los datos de la IMU, de modo que se mantenga siempre dentro de $\pm 3^\circ$ con respecto al rumbo inicial, realizando las correcciones de giro necesarias automáticamente.

Cuando se requieren acciones de control de motor, la minicomputadora principal transmite las instrucciones al microcontrolador Arduino a través del puerto serie. El microcontrolador genera las señales de pulso necesarias para activar los dos motores de las ruedas tipo oruga. Cada señal es manipulada por un puente H que controla la potencia del motor y el flujo de corriente para realizar acciones de avance, retroceso y parada. Una vez que se presiona el botón de parada en la GUI, el programa registra la hora final y detiene los motores, terminando así la ruta de perfilado.

7.4.5. Procedimiento de elaboración de perfiles

La medición comienza en un punto de referencia previamente definido y el vehículo con dirección al mar, perpendicular a la línea de costa, como se suelen realizar los perfiles de playa. El PSO está programado para mantener y corregir un rumbo fijo a través de los datos de la brújula electrónica

que incorpora, lo que permite que los motores se controlen automáticamente a lo largo de una línea recta. El vehículo recorre la trayectoria sin detenerse y a una velocidad definida de perfilado hasta llegar a una distancia d , entre un punto de partida P_0 y un punto final P_n . El sistema perfilador mide 6 datos de inclinación por segundo, cada medición se define como un punto, midiendo a lo largo del recorrido el ángulo de inclinación α de n puntos. Así, el cambio de elevación h_i , $i = 1, 2, \dots, n$, entre dos puntos consecutivos es (11):

$$h_i = (d/n) \cdot \tan(\alpha_i) \quad (11)$$

Cada punto (x_i, y_i) del perfil se calcula al realizar la sumatoria de todos los segmentos d/n recorridos hasta ese punto, al igual que la sumatoria de las alturas h calculadas de cada uno de los puntos anteriores, como se muestra en la Figura 43. El punto de referencia y P_0 deben establecerse preferiblemente en la misma posición; de lo contrario, debe medirse la distancia entre el punto de referencia y P_0 . La trayectoria de creación de perfiles, la adquisición de datos y el almacenamiento comienzan y terminan cuando se activa el botón de inicio/parada de la GUI. Luego, los datos se procesan para trazar el perfil (Fig. 44).

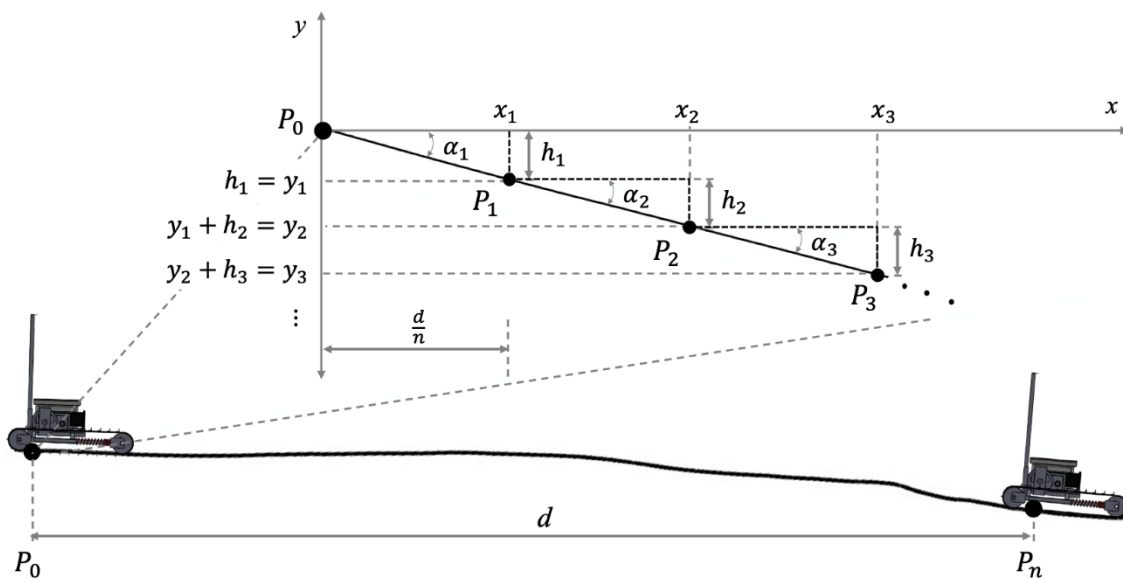


Figura 43. Cálculo del perfil a partir de datos de IMU y GPS.

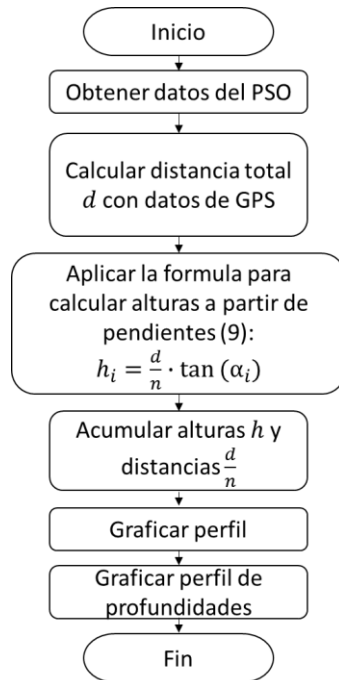


Figura 44. Procedimiento para generar el perfil después de las mediciones.

Al contar con los datos de inclinación y distancia ya listos, se procede a aplicar el proceso descrito anteriormente para generar el perfil, que consiste en obtener las elevaciones a partir de inclinación y distancia, para después acumular los valores y graficar.

8. Resultados

Después de evaluar el concepto del perfilador electrónico para playa y zona submarina descrito en la sección 7.3 de este documento, ahora se describen las pruebas subsecuentes realizadas en diferentes playas al sur de la península de Baja California. Anteriormente se mostró el procedimiento para generar un perfil del fondo del mar a partir de datos de inclinación al desplazar un instrumento desde el punto de interés hasta la orilla de la playa, pero era necesario un medio de transporte para ingresar el equipo de medición al mar para después recobrarlo. A continuación, se presentan los resultados de las pruebas utilizando los prototipos de vehículos desarrollados.

8.1. Primer levantamiento

Se realizaron mediciones en la playa El Tecolote donde se probó el primer prototipo desarrollado y se validaron las mediciones al compararlas con otros métodos, debido a que en esta playa el oleaje es tranquilo y permite perfilar la zona de rompiente con los métodos tradicionales.

Se inició el recorrido desde la playa con dirección al mar y se fueron registrando los datos de los sensores abordo a lo largo del recorrido (Fig. 45).



Figura 45. Mediciones en playa El Tecolote, La Paz, B.C.S., con prototipo desarrollado.

Con el fin de tener un perfil para comparar los resultados obtenidos, se realizó un levantamiento de la misma zona con mediciones cada 2 metros, pero utilizando un equipo topográfico.

Los primeros dos recorridos se realizaron haciendo pausas cada dos metros, para comparar punto a punto las mediciones de ambos métodos (Fig. 46).

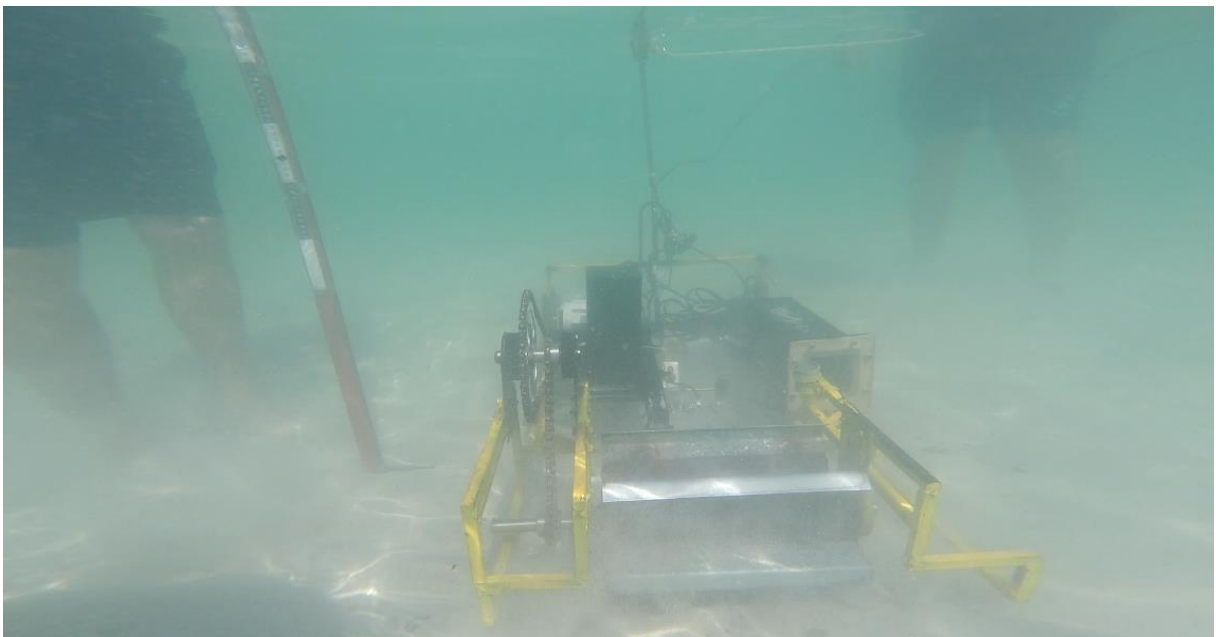


Figura 46. Mediciones bajo el agua cada dos metros para comparar métodos.

En estas pruebas, se utilizó el primer prototipo de vehículo anfíbio de baja velocidad para transportar el sensor de inclinación. Las mediciones se realizaron de manera simultánea con ambos métodos para evitar posibles variaciones en el fondo marino (Fig. 47).



Figura 47. Mediciones con equipo topográfico en playa El Tecolote, B.C.S.

Se procesaron los datos obtenidos y se generaron los perfiles tanto con el método topográfico como con el sistema desarrollado, además de mostrar la profundidad registrada con el sensor de presión a bordo del vehículo (Fig. 48).

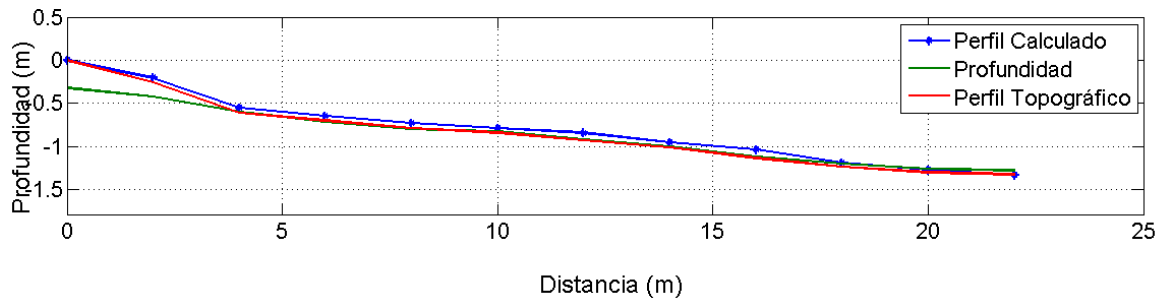


Figura 48. Perfil generado vs profundidad medida y topografía.

El perfil generado a partir de inclinación se obtuvo de los siguientes datos (Fig. 49):

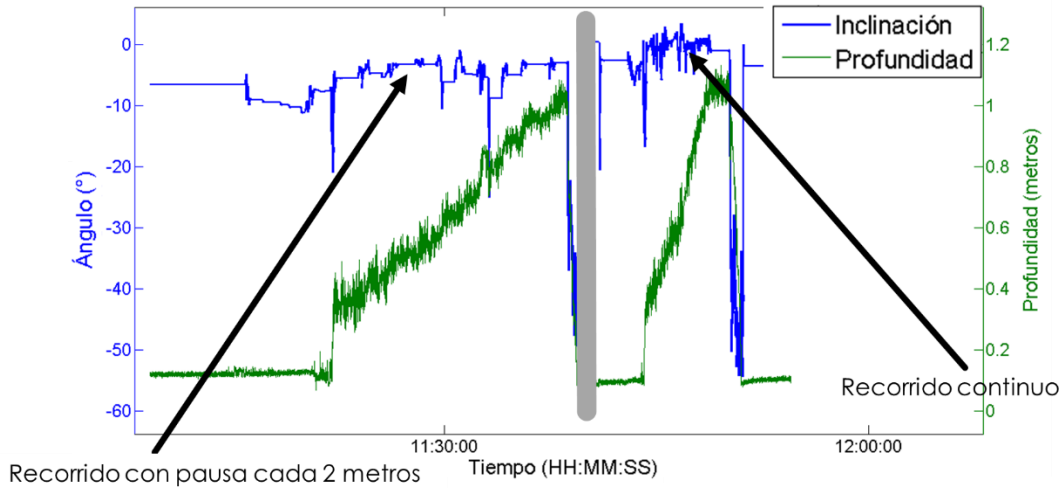


Figura 49. Datos antes de procesar (azul) y profundidad (verde).

Los datos en color azul representan la inclinación registrada por el sensor inercial mientras que la gráfica en verde representa la medición de profundidad. En los datos de inclinación se pueden apreciar diferentes puntos donde se muestra una recta horizontal que representa que no hubo cambios en inclinación dado que el vehículo estuvo detenido. La gráfica de profundidad ilustra el punto donde el vehículo ingresa al mar y comienza a tener valores ascendentes, registrando además la oscilación en profundidad debido al oleaje.

Se realizó un segundo recorrido, primero se realizó el recorrido topográfico y después el de inclinación, a diferencia del primer recorrido que se tomaron juntos (Fig. 50).

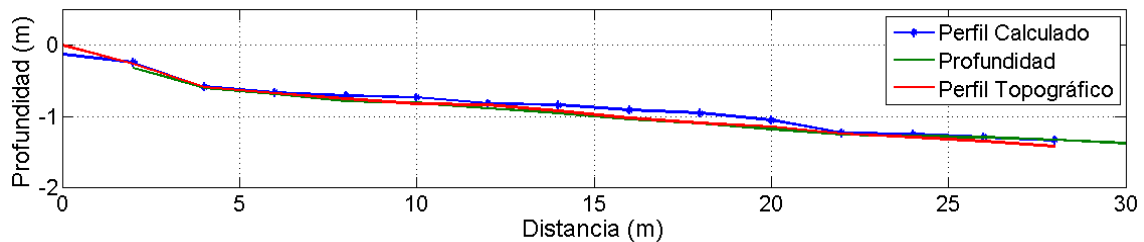


Figura 50. Perfil generado en el segundo recorrido vs profundidad medida vs topografía.

Los datos de inclinación medidos junto a los datos de profundidad y sincronizados, que representan un recorrido completo se puede apreciar en la Figura 51. Se distinguen tres principales etapas en esta gráfica, que son los datos que se utilizaron para graficar el perfil señalados en un ovalo, una sección a la mitad de la gráfica con el vehículo detenido para registrar datos de profundidad y oleaje; finalmente se muestran los datos que representan el regreso del vehículo perfilador hacia la orilla.

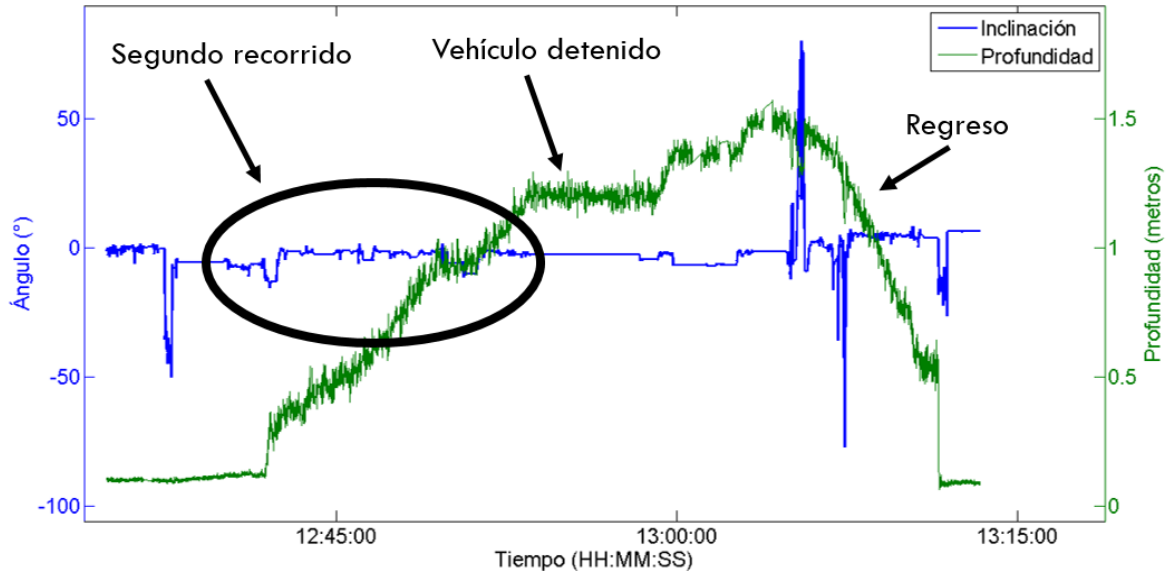


Figura 51. Datos antes de procesar (azul) y profundidad (verde), segundo recorrido completo.

Un acercamiento a los datos utilizados para generar el recorrido se puede ver en la Figura 52. La gráfica de inclinación está dada en grados ($^{\circ}$), donde un ángulo de 0° corresponde a una superficie horizontal nivelada, un valor positivo representaría una pendiente ascendente y un valor negativo representaría una pendiente descendente. Se puede apreciar que el inicio de la medición señala una pendiente descendente al estar sobre el frente de playa antes de ingresar al mar y que va cambiando su pendiente a un valor cercano a cero mientras se adentra en el mar.

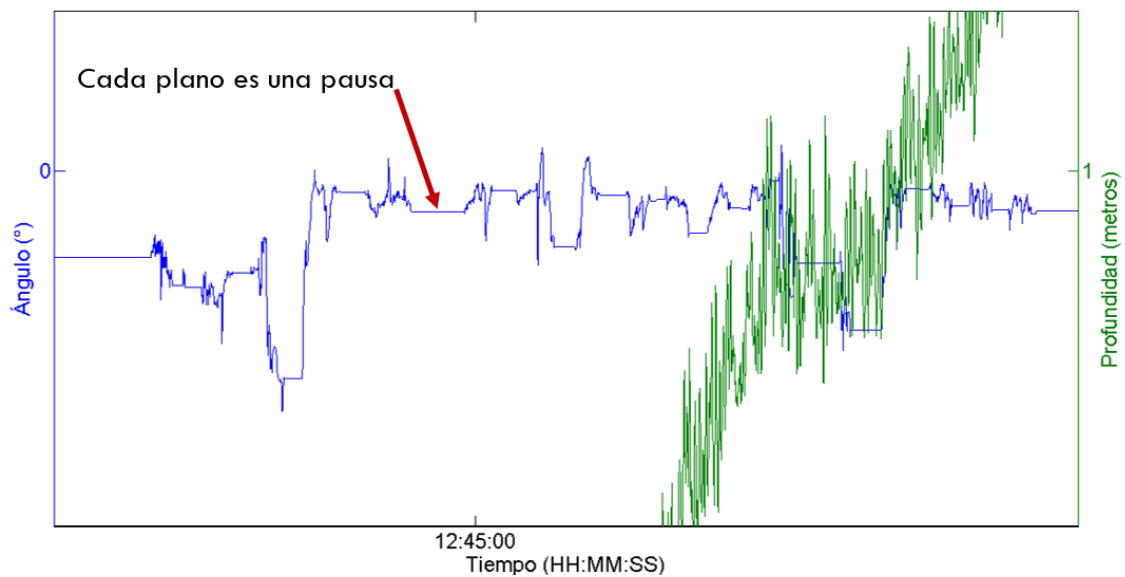


Figura 52. Acercamiento a los datos de inclinación de un recorrido.

8.2. Pruebas con el prototipo final

Además de las mejoras en diseño y movilidad, esta nueva versión realiza mediciones de inclinación de forma continua durante todo el recorrido, a diferencia de la versión anterior que se probó tomando datos cada 2 metros, lo que permite un nivel de detalle mayor que el obtenido en otros métodos.

Se montó el vehículo y todos los componentes se probaron e integraron en el sistema (Fig. 53). El perfilador subacuático de oruga se maniobró en recorridos hacia el mar para verificar su correcto funcionamiento, la velocidad programada es de 0.07 m/s. La batería proporciona 4 horas de funcionamiento continuo.

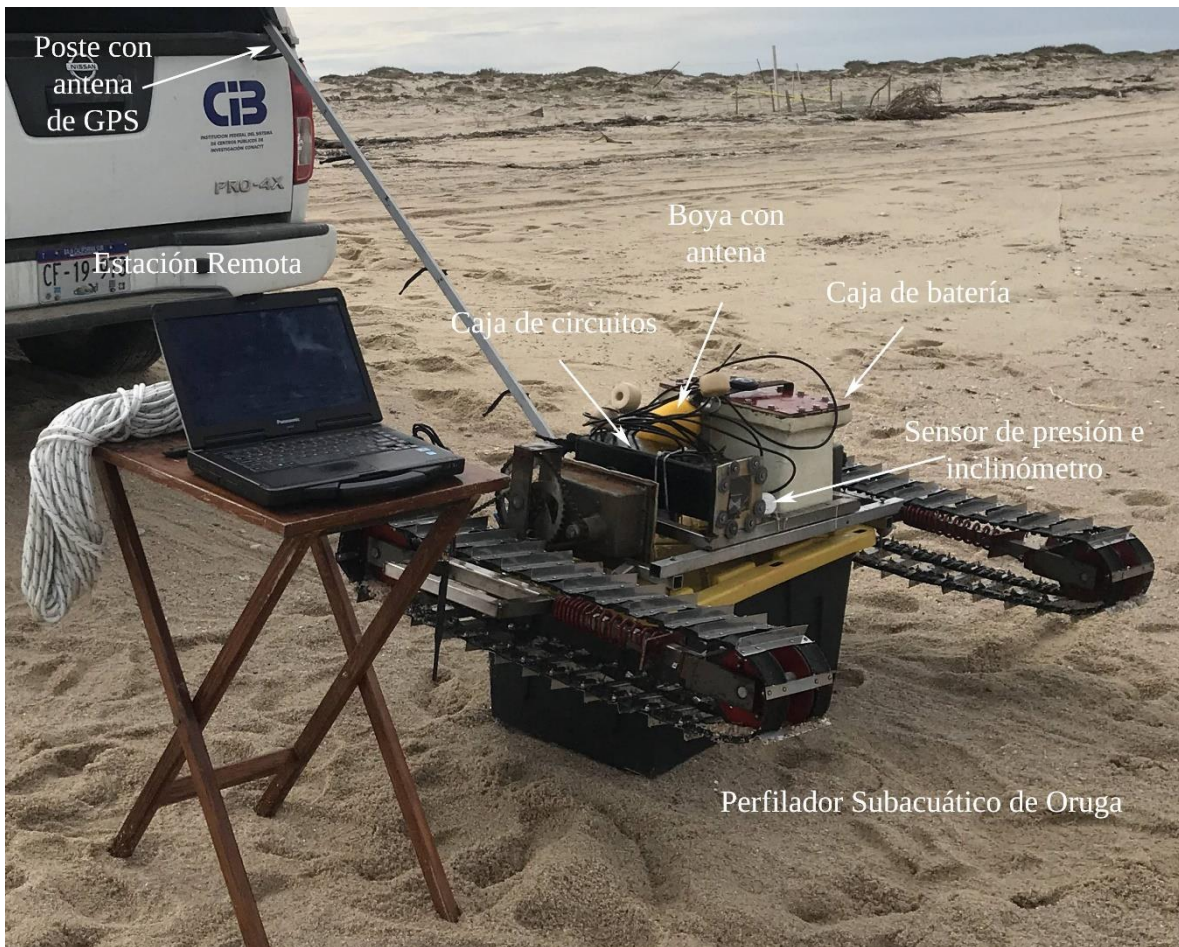


Figura 53. Puesta a punto del sistema perfilador para ser ingresado al mar.

Se realizaron una serie de mediciones utilizando el equipo topográfico en la misma playa El Tecolote descrita anteriormente. El PSO se desplazó a lo largo de 22 m siguiendo una ruta definida,

comenzando a 3 m de la línea de costa. Los puntos del perfil topográfico se definieron a cada 2 m a lo largo de la ruta, iniciando en el mismo punto del PSO (Fig. 54a). Los detalles del perfil obtenido con el PSO entre 2 y 4 m, que es la zona donde inicia el mar, no se detectan en el perfil con mediciones cada 2 m del equipo topográfico. Se realizó una segunda comparación de los resultados de perfilado en una zona diferente de la misma playa (Fig. 54b). Los resultados confirman una buena concordancia entre los dos perfiles, donde los primeros 24 m corresponden a zona de playa y el resto bajo el mar. El perfil medido con el equipo topográfico se realizó hasta los 30 m debido a que se dificulta que una persona continúe haciendo mediciones dentro del mar, mientras que el punto final del PSO llegó hasta los 43 m y un metro de profundidad. Los perfiles se compararon mediante la prueba t-Student (Torrie et al., 1996), y se obtuvo una diferencia media de 0.4352 cm con una desviación estándar de 2.092 cm, en la que las diferencias no fueron significativamente diferentes de cero ($t = -0.208$, $n = 15$, $p > 0.05$).

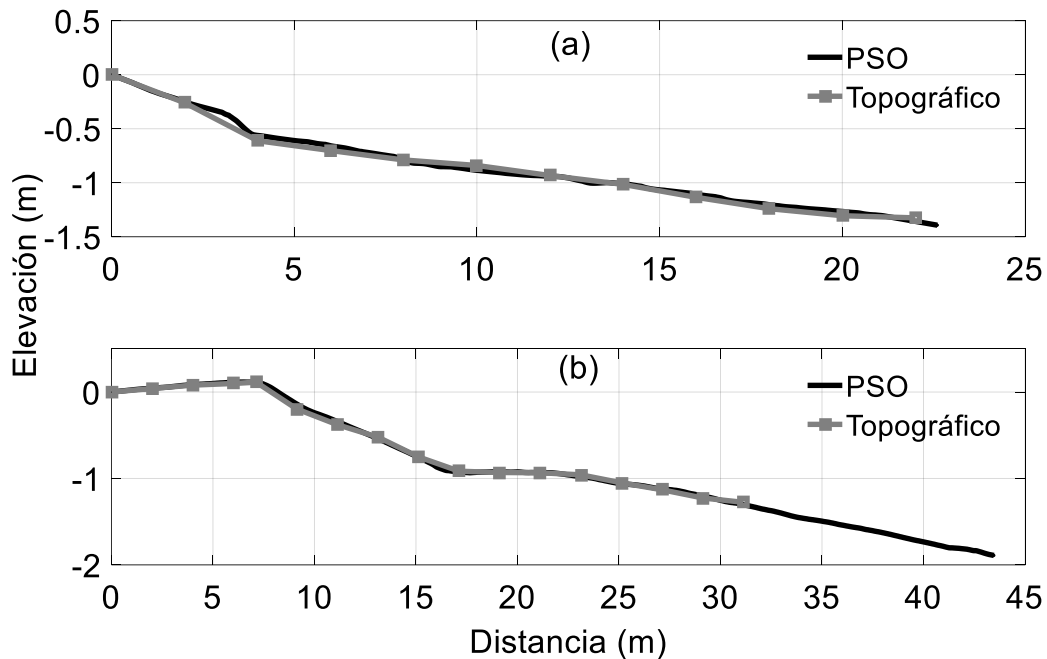


Figura 54. Comparación de perfiles utilizando el PSO y topográfico. (a) Ruta seleccionada con 3 m de playa; (b) Segunda ruta con 20 m de playa.

Otras pruebas de perfilado se realizaron en la playa de Punta Arenas. Esta playa fue seleccionada debido a su pendiente relativamente abrupta cerca de la zona de *swash* de aproximadamente 1.5 m de cambio de profundidad en 10 m de recorrido. Se colocaron dos cables de seguridad en los lados traseros izquierdo y derecho del vehículo para lograr la recuperación de emergencia si fuera necesario. Esta ubicación permite evaluar la configuración y operación del sistema PSO, donde el equipo topográfico es incapaz de operar debido a la accesibilidad limitada para maniobrar el poste de medición en estas condiciones bajo el agua.

Un recorrido del vehículo perfilador PSO en una de las mediciones se describe en la Figura 55, donde se puede ver antes de entrar al mar mientras se desplaza en la zona de *swash* (Fig. 55a), unos metros adelante, ya dentro del mar en una zona turbulenta se puede ver la boya amarilla con la antena de comunicación entrando al mar (Fig. 55b). En una zona más profunda se aprecia solo la boya con la antena de comunicación y el poste con la antena GPS (Fig. 55c), por último, en el punto final del recorrido (Fig. 55d) solo es posible ver la boya y la antena GPS es casi imperceptible.

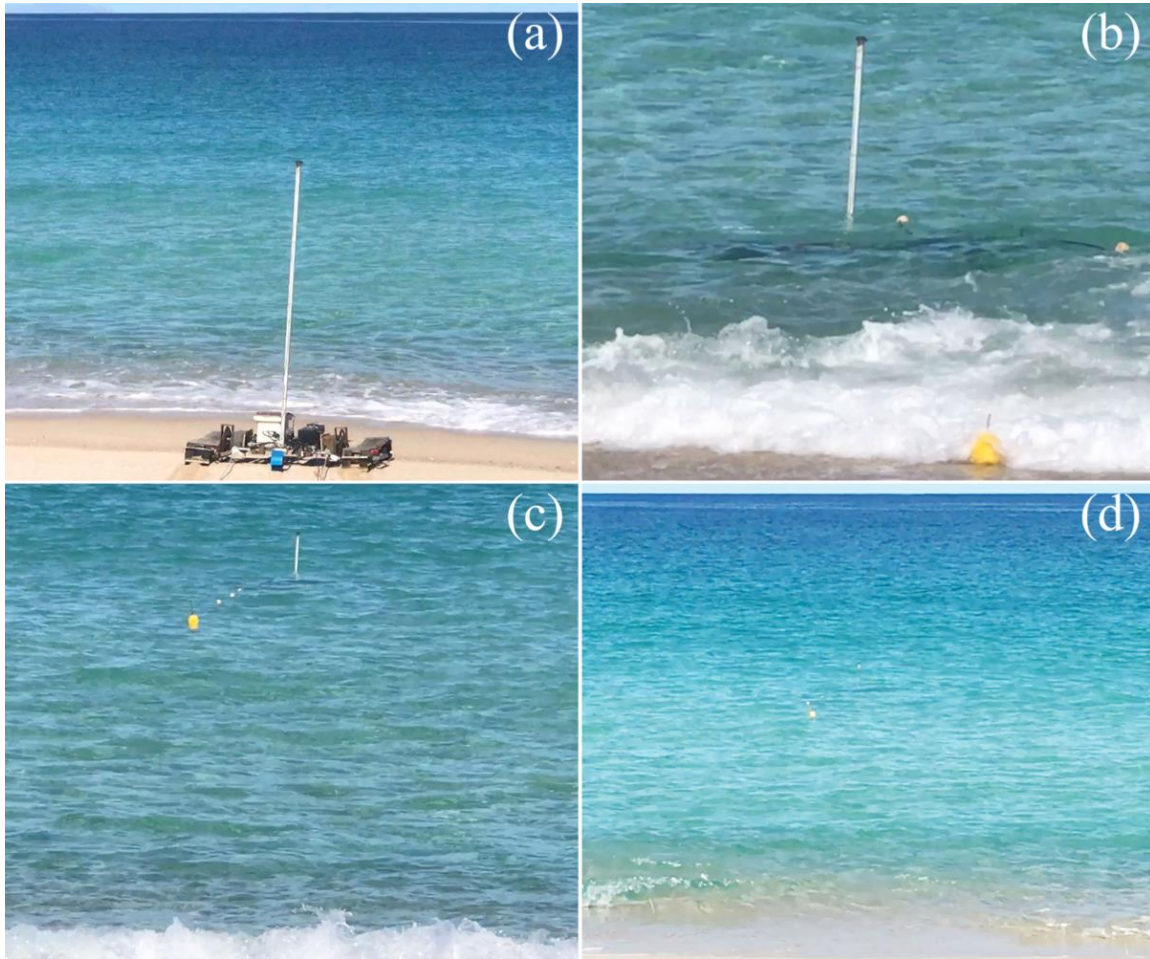


Figura 55. PSO perfilando en la playa Punta Arenas, B.C.S. (a) Vehículo en zona de *swash*; (b) PSO entrando al mar; (c) Antena del radio modem flotando con su boya; y (d) Punto final del perfilado.

El perfil generado de un primer recorrido en esta playa Punta Arenas, utilizando los datos obtenidos de inclinación y distancia a través del GPS se muestra en la Figura 56. Se pueden notar los diferentes cambios en el perfil debido a la medición continua en todo el recorrido. En este perfil, la zona de playa termina a los 21 m y comienza el mar; aproximadamente a 23 m se ve una pequeña elevación que corresponde a la zona de transición con el mar (mayor detalle en la Figura 58).

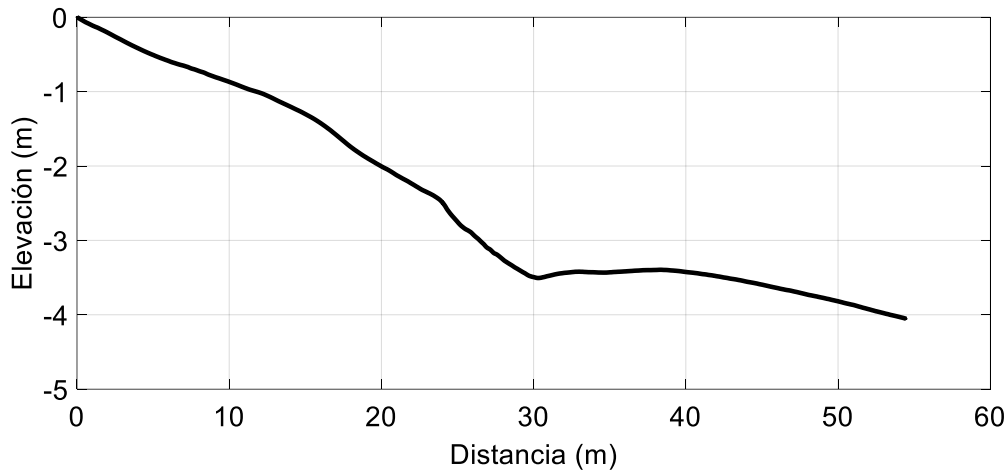


Figura 56. Perfil generado con PSO en la playa Punta Arenas, B.C.S.

En este mismo recorrido se obtuvieron datos de profundidad con el sensor de presión incorporado al vehículo PSO, que se sincronizan junto a los datos de inclinación y posición por GPS. Desde la zona de *swash*, el sensor de presión es capaz de registrar profundidad desde que es alcanzado por una ola. Con estos datos de profundidad y distancia, también es posible generar un perfil de la zona subacuática como el mostrado en la Figura 57. En este caso, los primeros datos verdaderos de profundidad se obtienen cuando la columna de agua tiene aproximadamente 0.25 m de profundidad debido a la posición del sensor en el marco PTR, que se produce a 22 m del punto de referencia de inicio. Los datos sin procesar muestran las variaciones de la señal de presión debido a las olas del mar a lo largo del recorrido (Fig. 57a). Luego se calculó un promedio móvil de datos con una ventana de 30 mediciones para filtrar estas variaciones, y se obtuvo una señal más suave de la profundidad (Fig. 57b). Invertiendo el signo de los datos, el perfil resultante de la zona submarina se muestra en la Figura 57c, donde se midió una profundidad de aproximadamente 2 m.

En la Figura 58 se muestran los datos del sensor de presión que complementan el perfil, que se obtienen en el mismo recorrido para las Figuras 56 y 57. La lectura de presión debe coincidir con el perfil PSO al realizar un ajuste en la altura debido a la posición de medición inicial de la columna de agua en la zona de *swash*, a unos 22 m del punto de referencia de inicio.

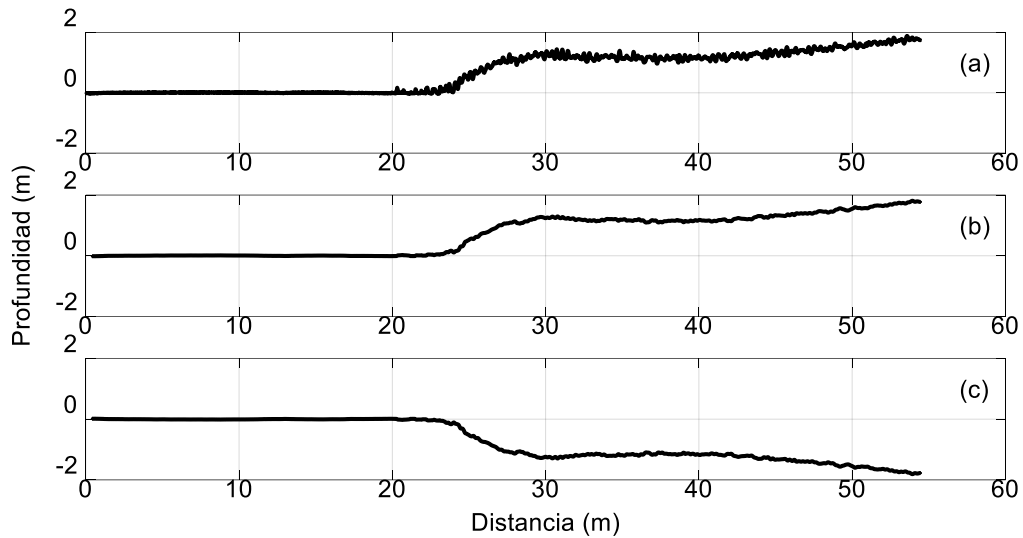


Figura 57. Lecturas del sensor de presión con 22 m de playa: (a) Dato de profundidad sin procesar; (b) Datos de profundidad filtrados; (c) Invertidos.

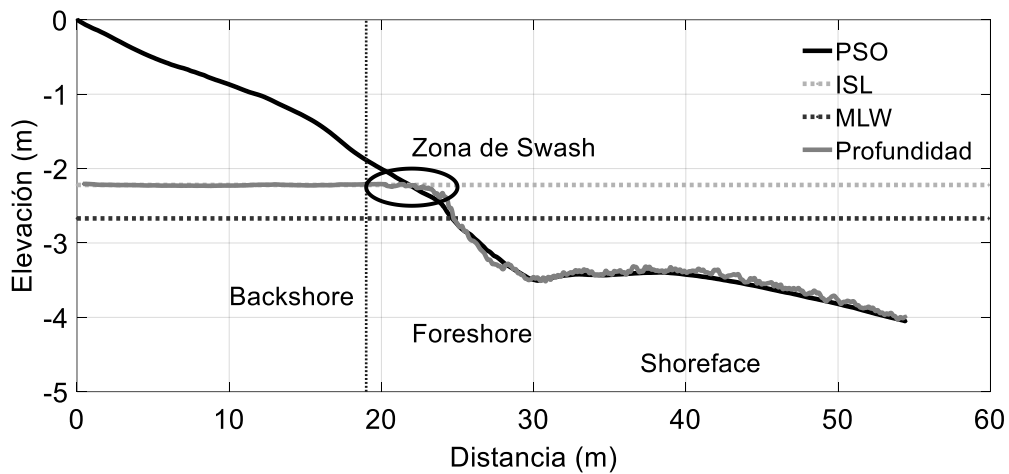


Figura 58. Nivel del mar instantáneo (ISL), bajamar media (MLW) y el perfil generado con PSO con los datos de profundidad coincidentes en la playa Punta Arenas, B.C.S.

El nivel instantáneo del mar (ISL) en un momento dado se puede calcular a través de los datos de profundidad promediados y filtrados con el promedio móvil en cualquier punto fijo de la ruta. La zona de *swash* donde las olas que llegan se desplazan de arriba abajo en la playa, crea una incertidumbre sobre donde se encuentra realmente el nivel del mar en ese determinado momento, que se puede lograr identificar con estas mediciones. El nivel de bajamar media (MLW) se puede posicionar en el perfil aplicando la diferencia del ISL previamente calculado y las tablas de mareas.

Otro perfil se realizó en la misma playa de Punta Arenas reportada anteriormente, pero desde otro punto de partida, con unos 200 m de separación. En este caso, se encontró un nivel de marea más alto y una pendiente más abrupta (Fig. 59). El PSO recorrió unos 65 m en la ruta seleccionada, de los cuales los primeros 15 m corresponden a la zona de playa y los otros 50 m están bajo el mar. Los datos de profundidad se muestran con un promedio móvil con ventana de 30 datos, y se perciben algunas oscilaciones debido a las olas del mar.

Si se logra ubicar el nivel medio del mar en dos diferentes perfiles, se pueden referenciar entre ellos y se puede ajustar su elevación.

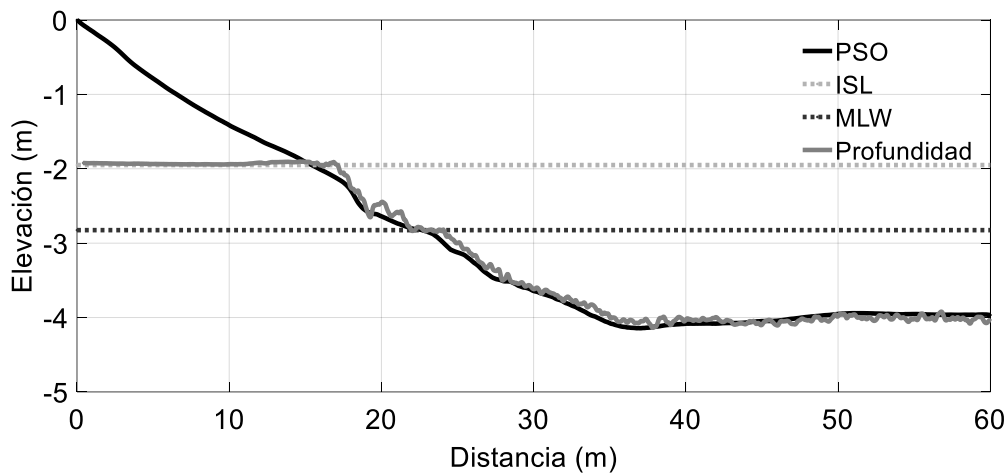


Figura 59. Perfil generado en marea alta con el PSO y comparado con datos de profundidad en la playa Punta Arenas, B.C.S.

Debido a la naturaleza altamente dinámica de la zona costera, la precisión del PSO se estimó a través de la desviación estándar, realizando 10 mediciones en una playa compacta en condiciones de repetibilidad que involucran la misma ubicación, procedimiento, operador y en un período corto (JCGM, 2008; Batstone, 2013). La desviación estándar resultante fue 1.32 cm a lo largo de la playa seleccionada de 26 m de longitud y 2.22 m de elevación. Esta desviación estándar representa una repetibilidad confiable del PSO, similar a la reportada para el método de Emery (Krause, 2004).

8.3. Cambios en morfología a lo largo del año

Como ejercicio complementario mientras se realizaban pruebas de concepto y de diseño en la playa de Agua Blanca, se realizaron diferentes mediciones de perfil de playa sin medir la zona subacuática utilizando el equipo topográfico y una variante del método de Emery que se evaluó. En total se realizaron 4 perfiles de playa distribuidos en 4 meses.

El punto de referencia seleccionado se situó a unos 70 m de la costa. Se realizaron mediciones con distancia variable entre puntos, ubicando cada uno donde existían diferencias de altura notables. Los perfiles resultantes se muestran en la Figura 60. La diferencia entre los dos métodos es más relevante en los puntos finales, debido al error acumulativo del método modificado de Emery. La morfología de la playa tiene un cambio significativo cerca de la costa debido a los recientes efectos de los huracanes John, Rosa y Sergio, que ocurrieron en 2018.

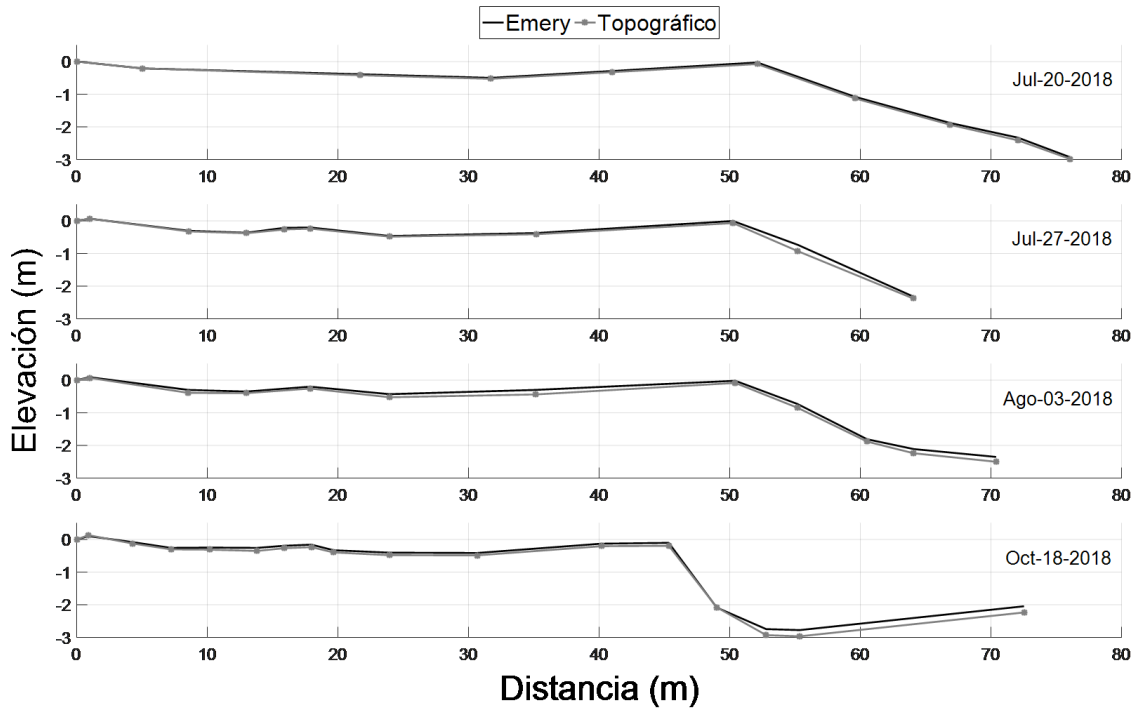


Figura 60. Cambios en morfología a lo largo del año medidos utilizando equipo topográfico y el método Emery.

Se puede notar con estos perfiles que la morfología de las playas puede sufrir cambios a lo largo del año y puede cambiar drásticamente en poco tiempo ante la presencia de tormentas (Fig. 61). Al final, de forma natural las playas tienen la capacidad de recuperarse y volver a un equilibrio.



Figura 61. Escarpe en playa Agua Blanca, B.C.S. generado luego del paso de una tormenta.

9. Discusión y conclusiones

El sistema de perfilado propuesto es una alternativa apropiada para estudiar transectos desde la playa hasta la zona de rompiente del oleaje. El perfilador subacuático de oruga es una herramienta práctica y de bajo costo, que mide de manera autónoma la elevación, profundidad y distancia a lo largo de una ruta para calcular el perfil y el nivel instantáneo del mar.

Los resultados del PSO muestran una precisión similar a los perfiles topográficos, con diferencias mínimas que pueden ser insignificantes para la mayoría de las aplicaciones. Las mediciones continuas permiten aumentar la resolución del perfil, lo que puede resultar en una ventaja sobre otros métodos.

Con base en los resultados de la incertidumbre, el PSO es un sistema confiable, pertinente para perfilar la zona de rompiente del oleaje. El PSO fue concebido para estudiar la forma de esta importante zona para completar el perfil de la playa, mientras que el método Emery de bajo costo y el topográfico no son viables para operar en esta zona en particular. Además, el PSO está equipado con componentes electrónicos adecuados y materiales accesibles de adquirir para su implementación práctica, cuyo costo es de aproximadamente \$32000 MXN (cotizado en el año

2021). El PSO tiene una maniobrabilidad que va desde realizar recorridos sencillos hasta girar sobre su propio eje, que está controlado por dos grados de libertad. El PSO puede moverse adaptándose a las condiciones del terreno, debido a su gran superficie de contacto con el suelo, a pesar de moverse a baja velocidad.

Los motores que incorpora el vehículo están limitados en potencia, pero se logró un diseño de vehículo a bajo costo con el presupuesto disponible, y se consiguió probar el concepto de forma satisfactoria, aunque no fue posible probar con otro motor de mayor capacidad, lo que impidió probarse en playas con pendientes más pronunciadas.

Se evaluó en diferentes playas en la zona sur de Baja California Sur y con base en los resultados obtenidos, se comprobó que es posible medir el perfil y zona de rompiente. Queda pendiente su evaluación en playas de mayor energía, para lo cual se requeriría un vehículo con sensores *ad hoc*, es decir bajo las mismas condiciones y el mismo diseño se puede construir el prototipo con elementos de más calidad, principalmente el sistema de propulsión. A partir de las mediciones realizadas en la zona de Agua Blanca con equipo topográfico durante varios meses se puede observar que al ser una playa expuesta al Océano Pacífico cambia su morfología drásticamente a lo largo del año, como se suponía en la hipótesis inicial, por lo que se requiere mejorar los componentes para trabajar en este tipo de playas.

Las mediciones de profundidad sirven como un método redundante que da certidumbre al resultado obtenido, además de brindar información referente a las condiciones de oleaje como altura de ola y frecuencia (Fig. 62).

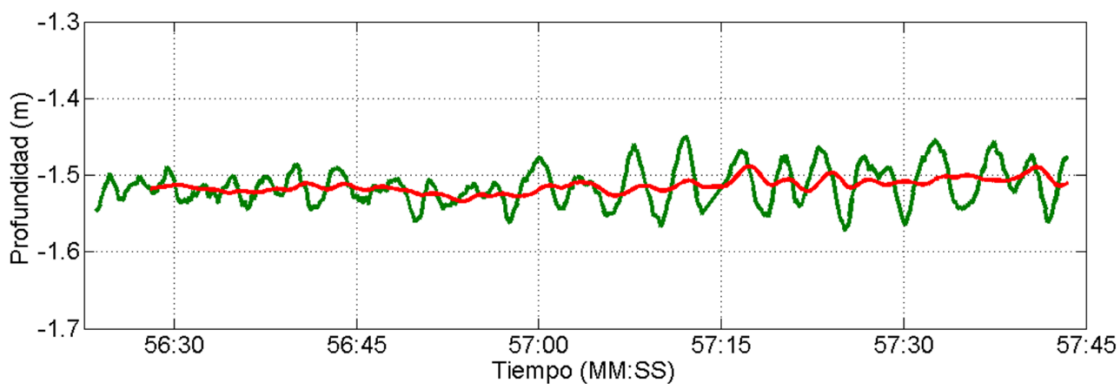


Figura 62. Medición de profundidad con el vehículo perfilador detenido dentro del mar.

9.1. Dificultad para medir dentro del mar con otros métodos

En algunas playas con oleaje calmo, es posible continuar sin inconvenientes el perfil de playa dentro de la zona subacuática utilizando métodos que implican que una persona ingrese al mar, como son

los métodos topográficos o manuales. Pero en playas donde el oleaje es intenso o durante condiciones de oleaje moderado, es complicado que una persona pueda realizar mediciones en la zona de rompiente del oleaje sin tener incertidumbre en los resultados, además del riesgo que implica ingresar al mar en esas condiciones (Fig. 63).



Figura 63. Medición del perfil con incertidumbre y riesgo para el operador debido al oleaje.

9.2 Trabajo futuro y recomendaciones

Además de la tarea de perfilado para esta zona, el PSO puede integrar otro tipo de sensores y actuadores para lograr una variedad de estudios costeros de interés para diferentes sectores, tanto académicos como gubernamentales y económicos.

Si una playa presenta un oleaje demasiado intenso, puede requerir que al prototipo desarrollado se le realicen adecuaciones como colocar una cubierta con un diseño hidrodinámico y un coeficiente de arrastre adecuado para evitar ser afectado por la fuerza del oleaje. Dependiendo la forma exterior de un cuerpo, presenta diferentes coeficientes de arrastre, siendo la forma de gota de agua una alternativa a considerar (Fig. 64).

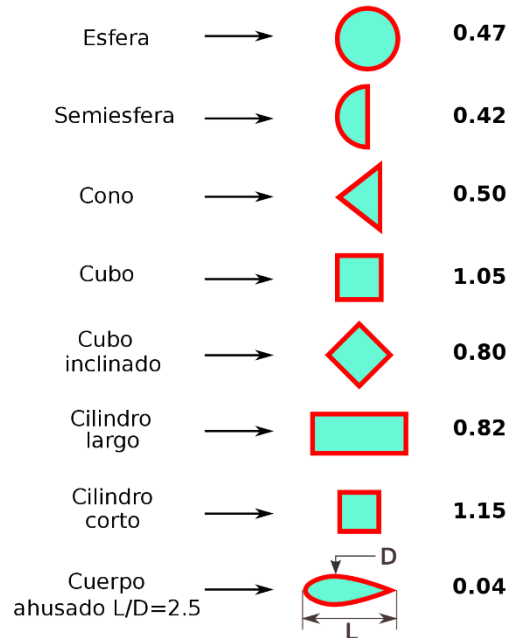


Figura 64. Coeficientes de arrastre para diferentes formas geométricas para número de Re aproximadamente a 104
(Tomado de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Drag-es.svg>).

Los motores utilizados en el prototipo pueden ser mejorados con un modelo especializado para mejorar su velocidad y torque, lo que permitirá realizar mediciones más rápido.

La generación del perfil final aún requiere trabajo manual por parte del usuario para procesar los datos. Es posible la auto generación del perfil al desarrollar un algoritmo adecuado.

9.2.1 Perfilador Smartphone

Como parte de la experimentación en las alternativas para generar perfiles de playa, se identificó una posibilidad de utilizar un teléfono celular inteligente aprovechando la serie de sensores que incorpora como sensor de inclinación y GPS. Con estos dos sensores y el software adecuado, se podrían generar perfiles al deslizar el dispositivo con la ayuda de un trineo por la superficie a medir (Fig. 65).

Concepto de perfilador con Smartphone

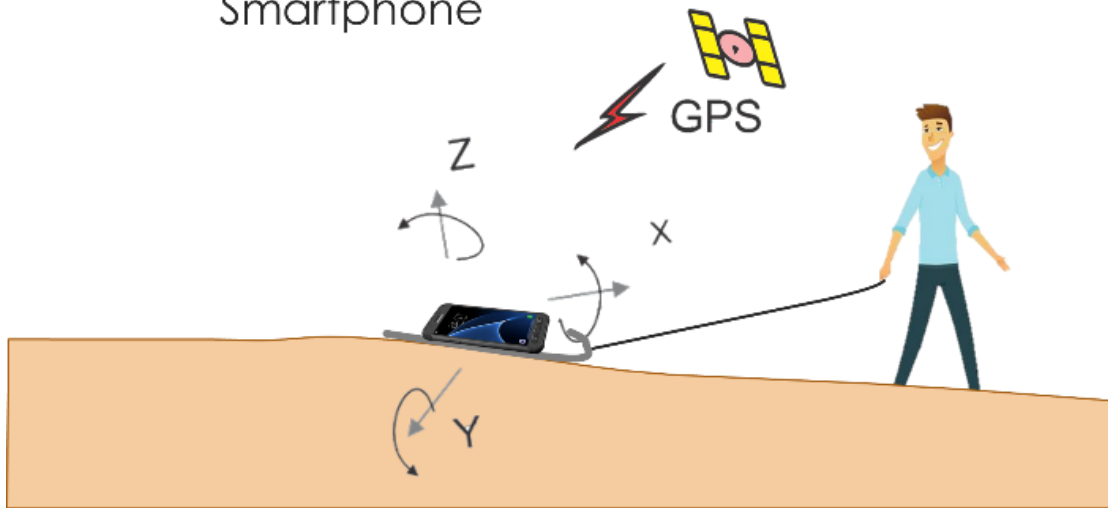
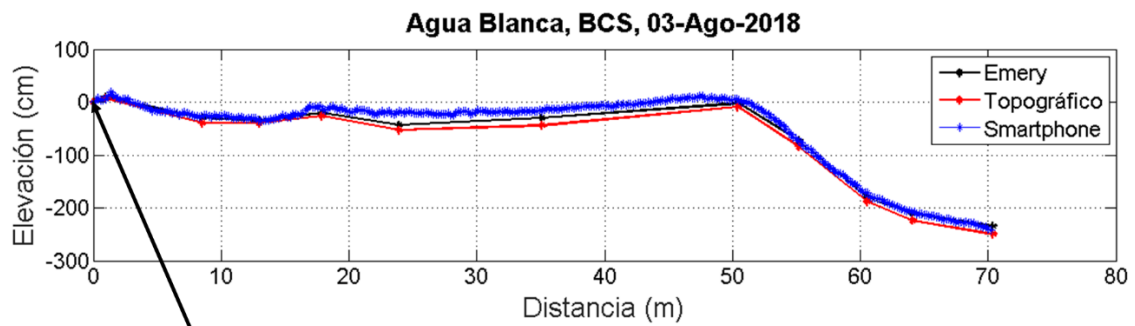


Figura 65. Concepto de perfilador con Smartphone.

A manera de ejemplo, se realizaron las primeras pruebas para evaluar el concepto y de manera general se tiene un perfil que representa el valor real pero aún con mejoras por hacer (Fig. 66), disponible para ser trabajado en un futuro por nuevos estudiantes.



El cero indica el inicio del recorrido

Figura 66. Perfil generado a partir de datos obtenidos con un Smartphone.

10. Referencias

- Andrade, F., & Ferreira, M. A. (2006). A simple method of measuring beach profiles. *Journal of Coastal Research*, 995-999.
- Angeloni del Castillo, P. E. (2003). *Impacto del uso recreativo sobre la fauna Macrobentónica de las playas arenosas de la Bahía de La Paz* (Maestría, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.).
- Armenta-Martinez, L. F. (2018). *Caracterización y diagnóstico biótico de la franja costera de la Bocana a Punta Arenas en la delegación de San Juan de los Planes, BCS México* (Tesis Especialidad, Universidad Autónoma de Baja California Sur).
- Batstone, D. J. (2013). Teaching uncertainty propagation as a core component in process engineering statistics. *Education for Chemical Engineers*, 8(4), e132-e139.
- Bernalte-Sánchez, P. J., Papaelias, M., & García-Márquez, F. P. (2020). Autonomous underwater vehicles: Instrumentation and measurements. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 23(2), 105-114.
- Birkemeier, W. A. (1981). *Fast, Accurate Two-Person Beach Surveys* (No. CERC-CETA-81-11). Coastal Engineering Research Center Fort Belvoir Va.
- Birkemeier, W. A., & Mason, C. (1984). The CRAB: A unique nearshore surveying vehicle. *Journal of Surveying Engineering*, 110(1), 1-7.
- Borgelt, S. C., Harrison, J. D., Sudduth, K. A., & Birrell, S. J. (1996). Evaluation of GPS for applications in precision agriculture. *Applied Engineering in Agriculture*, 12(6), 633-638.
- Chandrasekar, N., & Mujabar, P. S. (2010). Computer application on evaluating beach sediment erosion and accretion from profile survey data. *Computational Geosciences*, 14(4), 503-508.
- Cheng, J., Wang, P., & Guo, Q. (2016). Measuring beach profiles along a low-wave energy microtidal coast, West-Central Florida, USA. *Geosciences*, 6(4), 44.
- Clark, R. L., & Lee, R. (1998). Development of topographic maps for precision farming with kinematic GPS. *Transactions of the ASAE*, 41(4), 909.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.
- Cooper, N. J., Leggett, D. J., & Lowe, J. P. (2000). Beach-Profile Measurement, Theory and Analysis: Practical Guidance and Applied Case Studies. *Water and Environment Journal*, 14(2), 79-88.
- Côté, J. M. (1999). *The Measurement of Nearshore Bathymetry on Intermediate and Dissipative Beaches* (M.S. thesis, Civil Engineering, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA).
- Dally, W. R., Johnson, M. A., & Osiecki, D. A. (1994). Initial development of an amphibious ROV for use in big surf. *Marine Technology Society Journal*, 28(1), 3-10.

- Dauni, P., Firdaus, M. D., Asfariani, R., Saputra, M. I. N., Hidayat, A. A., & Zulfikar, W. B. (2019). Implementation of Haversine formula for school location tracking. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1402 077028.
- Delgado, I., & Lloyd, G. (2004). A simple low cost method for one person beach profiling. *Journal of Coastal Research*, 20(4), 1246-1252.
- Ehsani, M. R., Upadhyaya, S. K., & Mattson, M. L. (2004). Seed location mapping using RTK GPS. *Transactions of the ASAE*, 47(3), 909.
- Emery, K. O. (1961). A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and oceanography*, 6(1), 90-93.
- Farris, A. S., & List, J. H. (2007). Shoreline change as a proxy for subaerial beach volume change. *Journal of Coastal Research*, 740-748.
- Flather, R. A., & Hubbert, K. P. (1990). Tide and surge models for shallow water—Morecambe Bay revisited. In *Modeling marine systems* (pp. 135-166). CRC Press.
- García-Ríos, C. I., & Álvarez-Ruiz, M. (2007). Comunidades de quitones (Mollusca: Polyplacophora) de la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. *Revista de Biología Tropical*, 55(1), 177-182.
- Gemin, W., Rivera, R., Hidalgo, R., Fernández, J., & Revuelta, M. Á. (2011). Técnica digital para la medición óptica de distancia. In *XII Argentine Symposium on Technology (AST 2011)(XL JAIIO, Córdoba, 29 de agosto al 2 de septiembre de 2011)*.
- Guillén, J., & Díaz, J. I. (1990). Elementos morfológicos en la zona litoral: ejemplos en el delta del Ebro. *Scientia Marina*, 54(4), 359-373.
- Gutiérrez, J., Gómez-Muñoz, V., Villa-Medina, F., & Porta-Gándara, M. Á. (2012). Wireless beach profiler. *Journal of Coastal Research*, 28(4), 868-873.
- Hanslow, D. J. (2007). Beach erosion trend measurement: a comparison of trend indicators. *Journal of Coastal Research*, 50, 588-593.
- Hetherington, J. G. (2005). Tracked vehicle operations on sand—investigations at model scale. *Journal of terramechanics*, 42(1), 65-70.
- Hill, H. H., Kelley, J. T., Belknap, D. F., & Dickson, S. M. (2002). Co-measurement of beaches in Maine, USA: volunteer profiling of beaches and annual meetings. *Journal of Coastal Research*, 36(sp1), 374-380.
- Hornback, P. (1998). The Wheel Versus Track Dilemma. *ARMOR Magazine*, 33–34, March-April 1998.
- JCGM 100:2008, “Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)”, Paris: *BIPM Joint Committee for Guides in Metrology*, 2008, 134p.

- JoAnn A, & JoAnn D. (2005). Beach Profiling. *Pennsylvania Department of Conservation and Natural Resources*. Manual y reporte técnico.
- Kizil, U., & Tisor, L. (2011). Evaluation of RTK-GPS and Total Station for applications in land surveying. *Journal of earth system science*, 120(2), 215-221.
- Komar, P.D. (1998). Beach Processes and Sedimentation. *Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall*, 544p.
- Krause, G. (2004). The “Emery-Method” revisited—performance of an inexpensive method of measuring beach profiles and modifications. *Journal of Coastal Research*, 340-346.
- Landau, H. J. (1967). Sampling, data transmission, and the Nyquist rate. *Proceedings of the IEEE*, 55(10), 1701-1706.
- Langley, R. B. (1998). RTK GPS. *GPS World*, 9(9), 70-76.
- Lira-Beltrán, R. M. (2009). *Evolución holocénica de los ambientes sedimentarios costeros entre Punta Márquez y Punta Lobos, BCS, México* (Maestría, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).
- Lizárraga-Arciniega, R., Martínez-Díaz de León, A., Delgado-González, O., Torres, C. R., & Galindo-Bect, L. A. (2007). Alternancia de los ciclos de erosión/acreción de playa relacionados con el oleaje en Rosarito, Baja California, México. *Ciencias marinas*, 33(3), 259-269.
- Madeo, D., Pozzebon, A., Mocenni, C., & Bertoni, D. (2020). A low-cost unmanned surface vehicle for pervasive water quality monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(4), 1433-1444.
- Mason, D. C., Gurney, C., & Kennett, M. (2000). Beach topography mapping—a comparison of techniques. *Journal of Coastal Conservation*, 6(1), 113-124.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1), 1-15.
- Paredes-Lozano, L. (2016). *Análisis integral del uso de la ballena gris con fines turísticos en Puerto Adolfo López Mateos, BCS* (Maestría, Universidad Autónoma de Baja California Sur).
- Pedroza, D., Cid, A., García, O., Silva-Casarín, R., Villatoro, M., Delgadillo, M. A., ... & Infante-Mata, D. (2013). Manejo de ecosistemas de dunas costeras, criterios ecológicos y estrategias. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF, México*.
- Pethick, J., & Burd, F. (1993). *Coastal defence and the environment: a guide to good practice*. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food.
- Puleo, J. A., Pearre, N. S., He, L., Schmied, L., O'Neal, M., Pietro, L. S., & Fowler, M. (2008). A single-user subaerial beach profiler. *Journal of Coastal Research*, 24(4), 1080-1086.
- Rizos, C. (2007). Alternatives to current GPS-RTK services and some implications for CORS infrastructure and operations. *GPS solutions*, 11(3), 151-158.

- Rodríguez-Meza, G. D. (1999). *Elementos mayores y traza en los sedimentos superficiales de La Laguna de la Paz, BCS, México* (Maestría, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).
- Romero-González, A. C. (2018). *Efecto del ambiente en la comunidad intermareal de playas arenosas protegidas en la Bahía de La Paz, BCS, México* (Maestría, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).
- Sahin, O., & Mohamed, S. (2009). Decision dilemmas for adaptation to sea level rise: how to, when to?. In *Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IEEM 2009. IEEE International Conference on* (pp. 1622-1626). IEEE.
- Sánchez, S., Fuentealba, O., Lange, H., & Zepeda, R. (2001). *Manual de carreteras, Volumen No. 2. Procedimientos de estudios Viales*, Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad.
- Sánchez-Arcilla, A., & Jiménez, J. A. (1994). Ingeniería de playas (I): conceptos de morfología costera. *Ingeniería del agua*, 1(2), 97-114.
- Saye, S. E., Van der Wal, D., Pye, K., & Blott, S. J. (2005). Beach–dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. *Geomorphology*, 72(1-4), 128-155.
- Schonberger, J. L., & Frahm, J. M. (2016). Structure-from-motion revisited. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4104-4113).
- Shukla, J. B., Verma, M., & Misra, A. K. (2017). Effect of global warming on sea level rise: A modeling study. *Ecological Complexity*, 32, 99-110.
- Smith, G. L., & Zarillo, G. A. (1990). Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photographic and beach profiling techniques. *Journal of Coastal Research*, 111-120.
- Smith, R. K., & Bryan, K. R. (2007). Monitoring beach face volume with a combination of intermittent profiling and video imagery. *Journal of Coastal Research*, 23(4), 892-898.
- Stockdon, H. F., & Holman, R. A. (2000). Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C9), 22015-22033.
- Tanaka, T., Shiraishi, T., & Hirabayashi, T. (2007). Shoreline survey method using amphibious walking robot and the navigation method regarding amphibious traveling. *IEEE UT & SSC, Tokyo*, 268-275.
- Tee, Y. H. (2013). *Development of autonomous amphibious vehicle maneuvering system using wheelbased guided propulsion approach* (Doctoral dissertation, UTAR).
- Torrie, R.G.D., Dickey, J.H., & Steel, D.A. (1996). *Principles and Procedures of Statistics*, 3rd edition. New York: McGraw-Hill, 672p.

- Turner, I. L., Harley, M. D., & Drummond, C. D. (2016). UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, 114, 19-24.
- Varela-Acevedo, E., Eckert, K. L., Eckert, S. A., Cambers, G., & Horrocks, J. A. (2009). Sea turtle nesting beach characterization manual. *Examining the effects of changing coastline processes on hawksbill sea turtle (Eretmochelys imbricata) nesting habitat. Beaufort: Master's Project, Nicholas School of the Environment and Earth Sciences, Duke University*, 46-97.
- Vega-Crespo, M.R. (2004). Construcción de rompeolas, escolleras y rocas in situ por el sistema de cimbra flexible "Bolsacreto"®. Tesis, Instituto Tecnológico de la Construcción A.C.
- Wong, J. Y., & Huang, W. (2006). "Wheels vs. tracks"—A fundamental evaluation from the traction perspective. *Journal of terramechanics*, 43(1), 27-42.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Yepes-Piqueras, V. (2007). Gestión del uso y explotación de las playas. *Cuadernos de Turismo*, (19). Recuperado a partir de <https://revistas.um.es/turismo/article/view/13731>.