



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE MEDICIÓN DE PERFILES DE
PLAYAS, EN FUNCIÓN DE CRITERIOS TÉCNICOS, OPERATIVOS Y ECONÓMICOS**

Autor

JUAN GUILLERMO TORRES CÓRDOBA

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento (Escuela ambiental)
Turbo, Colombia
2021



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE MEDICIÓN DE PERFILES DE
PLAYAS, EN FUNCIÓN DE CRITERIOS TÉCNICOS, OPERATIVOS Y ECONÓMICOS**

JUAN GUILLERMO TORRES CÓRDOBA

Trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero
Oceanográfico

Asesor

ALFREDO JARAMILLO VÉLEZ
Ingeniero Ambiental. - MSc. Oceanografía

Co-Asesor

CAMILO MATEO BOTERO SALTAREN
Ingeniero Ambiental y Sanitario. - Ph.D. Gestión del Agua y la Costa

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
ESCUELA AMBIENTAL – FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA
TURBO ANTIOQUIA
2021

Dedicatoria y agradecimientos.

Esta investigación está dedicada a mi familia quienes han vivido conmigo esta lucha de principio a fin, infinitas gracias por apoyarme en este sueño. En especial a mi madre Nohemy Córdoba Martínez (mi motor e inspiración) y mi pareja Dayana M. Carmona quién me ha apoyado a lo largo de toda la carrera.

A mis asesores Alfredo Jaramillo y Camilo M. Botero quienes, a partir de su conocimiento fueron pieza clave para el desarrollo de este trabajo. Gracias por el apoyo, asesoría, tiempo, motivación y amistad.

A todos los docentes que han hecho parte mi proceso de aprendizaje como persona y como profesional, en especial a aquellos que estuvieron prestos a colaborarme y resolver dudas durante este trabajo, Vladimir G. Toro y Carlos E. Gutiérrez.

A la Universidad de Antioquia por facilitarme algunos equipos para la medición de los perfiles de playa.

A todos los estudiantes de la Universidad de Antioquia, sede Ciencias del Mar, que me apoyaron, creyeron y brindaron sus conocimientos y apoyo para llevar este trabajo de grado a buen término. Aquellos que hicieron parte de las mediciones y me aconsejaron durante el proceso, Capitán Juan P. Suarez, Carlos D. Zuluaga, Luis A. Oquendo, Kisay Y. Vargas, Jaime A. Suarez, Alma Y. Niño, Kelis D. Romaña y Maria C. Aguirre.

Así, quiero mostrar mi gratitud a todas aquellas personas que estuvieron presentes en la realización de esta meta, de este sueño que es tan importante para mí, agradecer todas sus ayudas, palabras motivadoras, conocimientos, consejos y dedicación.

ÍNDICE GENERAL

1.	RESUMEN	8
2.	INTRODUCCIÓN	9
3.	OBJETIVOS	10
3.1	Objetivo general	10
3.2	Objetivos específicos	10
4.	MARCO TEÓRICO	10
4.1	Perfil de playa	10
4.2	Profundidad de cierre	11
4.3	Playas reflejantes	12
4.4	Playas disipativas	12
4.5	Morfología de playas	13
4.5.1	Berma	13
4.5.2	Barras de arena	14
4.6	Unidad Ambiental Costera (UAC)	14
4.7	Proceso Analítico Jerárquico (PAJ)	14
4.8	Parámetros estadísticos	16
4.8.1	Coefficiente de correlación de Pearson (r)	16
4.8.2	Coefficiente de determinación (r^2)	17
4.8.3	Error Cuadrático Medio (RMSE)	17
5.	ÁREA DE ESTUDIO	18
5.1	UAC-Darién	18
5.2	Playa Dulce (Turbo)	18
5.3	Playa Plan Parejo (Acandí)	19
6.	METODOLOGÍA	20
6.1	Etapa 1: Revisión documental de los MMPP	20
6.2	Etapa 2: Definición de factores técnicos, operativos y económicos.	21
6.3	Etapa 3: Verificación en campo de operatividad y precisión de cada método.	21
6.4	Etapa 4: Comparación de los MMPP con el método PAJ	23
6.5	Etapa 5: Análisis estadístico de correlaciones	23

7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	24
7.1	Métodos de medición de perfiles de playa	24
7.1.1	Método_Emery	25
7.1.2	Método_Delgado&Lloyd	25
7.1.3	Método_Andrade&Ferreira	26
7.1.4	Método_Chowdhury	27
7.1.5	Método_Puleo	28
7.1.6	Método_Nivel-Abney	29
7.1.7	Método_Nivel-Óptico	30
7.1.8	Método_Nivel-Electrónico.....	31
7.1.9	Método_Teodolito-Mecánico	32
7.1.10	Método_Teodolito-Electrónico.....	33
7.1.11	Método_Estación-Total	33
7.1.12	Método_DGPS	34
7.1.13	Método_RPAS.....	35
7.1.14	Método_Escáner-Laser-Terrestre	36
7.1.15	Método_Ecosonda	37
7.2	Comparación de los métodos por playa.....	38
7.2.1	Perfil de control UdeA.....	38
7.2.2	Playa Dulce	41
7.2.3	Playa Plan Parejo	44
7.3	Evaluación de la eficiencia operativa de acuerdo al tipo playa (reflejante y disipativa).....	47
7.4	Evaluación económica de los métodos	48
7.5	Evaluación PAJ de los métodos.....	50
8.	CONCLUSIONES	52
9.	RECOMENDACIONES	54
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
10.1	Referencias adicionales.....	58
11.	ANEXOS	59
11.1	ANEXO A: Evaluación de Factores Técnicos.	59
11.2	ANEXO B: Evaluación de Factores Operativos.	60
11.3	ANEXO C: Evaluación de Factores Económicos.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de playa.....	11
Figura 2. Ejemplo de estructura jerárquica. Modificado de Saaty (1980).	15
Figura 3. Mapa del golfo de Urabá. Los puntos establecen la ubicación de las zonas donde fueron medidos los perfiles de playa y se muestran unidos por líneas punteadas a fotografías asociadas a cada una de ellas.	19
Figura 4. Esquema-Método_Emery. Modificado de: Emery, 1961.	25
Figura 5. Esquema-Método_Delgado&Lloyd. Modificado de: Delgado & Lloyd, 2004. 26	
Figura 6. Esquema-Método_Andrade&Ferreira. Modificado de: Andrade & Ferreira, 2006.	26
Figura 7. Esquema-Método_Chowdhury. Modificado de Chwhury et al., 2014.	28
Figura 8. Esquema-Método_Puleo. Modificado de: Puleo <i>et al.</i> , 2008.	28
Figura 9. Esquema-Método_Nivel-Abney. Modificado de: asequipos.com.....	29
Figura 10. Esquema-Método_Nivel-Óptico. Modificado de: jmequipos.com y soluciontopografia.com.	30
Figura 11. Hilos estadimétricos.	31
Figura 12. Esquema-Método_Nivel-Electrónico. Modificado de geotop.bo y civiltec.mx.	31
Figura 13. Esquema-Método_Teodolito-Mecánico. Modificado de: alibaba.com.	32
Figura 14. Esquema-Método_Teodolito-Electrónico. Modificado de: civiltec.mx.	33
Figura 15. Esquema-Método_Estación-Total. Modificado de: jmequipos.com y dhayi.com.....	34
Figura 16. Esquema-Método_DGPS. Modificado de: alibaba.com	35
Figura 17. Esquema-Método_RPAS. Modificado de: jetstereo.com, geocom.cl y findglocal.com.	36
Figura 18. Esquema-Método_Escáner-Laser_Terrestre. Modificado de: geospatial.trimble.com.	37
Figura 19. Esquema-Método_Ecosonda. Modificado de: tecnoceano.com y nautica.com.....	37
Figura 20. Perfiles medidos en la UdeA. (a: comparación con los métodos manuales; b: comparación con métodos tecnológicos y c: comparación a diferentes alturas con el Método_RPAS).	39
Figura 21. Fotografía del perfil de control UdeA. (a: fotografía aérea de la zona y la línea representa por donde fue medido el perfil y b: muestra una vista en perfil de la zona, evidenciando las partes planas y las escalinatas).	40
Figura 22. Perfiles medidos en playa Dulce. (a: comparación con los métodos manuales; b: comparación con métodos tecnológicos y c: comparación a diferentes alturas con el Método_RPAS)	42
Figura 23. Fotografía del perfil en playa Dulce. (a: fotografía aérea de la zona y la línea representa por donde fue medido el perfil; b: canal presente en una parte del perfil y c: operarios realizando mediciones con el Método_Puleo).	43

Figura 24. Perfiles medidos en playa Plan Parejo. (a: comparación con los métodos manuales; b: comparación con métodos tecnológicos y c: comparación a diferentes alturas con el Método_RPAS)	45
Figura 25. Fotografía del perfil en la playa Plan Parejo. (a: fotografía de todos los métodos utilizados; b: muestra una vista en perfil de la zona, donde se evidencia el tamaño de los sedimentos, la pendiente abrupta y el oleaje rompiendo.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala fundamental de comparación pareada.....	15
Tabla 2. Índice aleatorio.....	16
Tabla 3. Porcentajes máximos de proporción de consistencia.	16
Tabla 4. Descripción de “r” por intervalos.	17
Tabla 5. Características de las playas de estudio.....	22
Tabla 6. Clasificación de los métodos manuales, tecnológicos y aplicados en campo.	24
Tabla 7. Comparación estadística de mediciones longitudinales en puntos de control.	38
Tabla 8. Duración de cada método - Perfil de control UdeA.	40
Tabla 9. Parámetros estadísticos – Perfil de control UdeA.....	41
Tabla 10. Duración de cada método - Perfil de playa Dulce.....	43
Tabla 11. Parámetros estadísticos – Playa Dulce.....	44
Tabla 12. Duración de cada método - Perfil de playa Plan Parejo.....	46
Tabla 13. Parámetros estadísticos – Playa Plan Parejo.	47
Tabla 14. Comparación en duración de la medición de cada método de acuerdo al tipo de playa.....	48
Tabla 15. Comparación de costos entre los diferentes métodos.	49
Tabla 16. Comparación de costos asociada al personal requerido para la MMPP con cada método.	50
Tabla 17. Resultados de la comparación mediante el proceso analítico jerárquico.....	51
Tabla 18. Referencias adicionales.	58
Tabla 19. Matriz de comparación - Factores Técnicos.	59
Tabla 20. Matriz de comparación – Factores Operativos.....	60
Tabla 21. Matriz de comparación – Factores Económicos.	61

1. RESUMEN

Los perfiles de playa permiten evidenciar la variabilidad en el espacio y en el tiempo que se presenta en las zonas costeras, por lo cual, se hace necesario conocer la aplicabilidad específica de los diferentes métodos para su medición. El presente estudio se concentra en un análisis comparativo de los métodos disponibles para la medición de perfiles de playa en función de tres criterios bases (factores técnicos, operativos y económicos) en dos tipos de playas diferentes (disipativa y reflejante). Los resultados mostraron un número importante de métodos (15), que de acuerdo a su naturaleza y complejidad fueron clasificados como manuales y tecnológicos. Bajo criterio propio y soportado en estudios anteriores y el análisis de los métodos, se determinó que el Método_Estación-Total es el más preciso, por ello se tomó como método de referencia para realizar el análisis estadístico. Aplicando el método de proceso analítico jerárquico se encontró que los métodos manuales dominan sobre los tecnológicos y, dándole una importancia igual a los tres criterios de evaluación, al igual que cuando los factores técnicos o los factores operativos presentan importancia extrema sobre los demás, el Método_Puleo resulta ser el más priorizado/recomendado y el Método_Ecosonda presentó la más baja priorización. En cuanto a los factores económicos, los métodos manuales siguen presentando una marcada diferencia sobre los tecnológicos y el Método_Emery es el más económico entre todos.

Palabras claves: perfiles de playas, métodos de medición, factores técnicos, factores operativos, factores económicos.

2. INTRODUCCIÓN

La morfología de la costa se da como resultado de la variable y constante interacción entre la hidrodinámica, climatología, geología y más recientemente los efectos producidos por la influencia antrópica. De forma general, las fuerzas influentes en este proceso pueden dividirse en procesos a largo plazo, entendiendo éstos como aquellos que modifican la costa en grandes escalas espaciales del orden de kilómetros, y procesos a corto plazo, ejemplo de esto, los eventos de tormentas que pueden causar grandes cambios en la costa en solo unas pocas horas (Krause, 2004).

Los cambios geomorfológicos en la zona costera ocurren de manera acelerada, por lo que es de vital importancia realizar un monitoreo constante de las mismas. Los perfiles de playa evidencian esa variabilidad en el espacio y en el tiempo, por lo cual, se hace necesario conocer la aplicabilidad específica de los diferentes métodos para la medición. No obstante, no todos los métodos que hoy en día existen son aplicables en cualquier tipo de proyecto que involucre este tipo de mediciones; el método a utilizar estará directamente relacionado con la rigurosidad requerida por dicho proyecto en términos de precisión y exactitud de los datos, por la cantidad de recursos económicos disponibles, por las condiciones de accesibilidad a la zona de estudio y las condiciones climáticas.

Los perfiles de playa han sido estudiados por numerosos autores, dada la importancia de estos en temas relacionados con la variabilidad espacio-temporal de la zona costera, pero aún existe un vacío respecto al desempeño de cada uno de los métodos cuando son aplicados en diferentes ambientes. Los métodos utilizados para la medición en campo de los perfiles de playa se pueden dividir en manuales (Emery, 1961; Delgado & Lloyd, 2004; Krause, 2004; Andrade & Ferreira, 2006; Puleo *et al.*, 2008; Chowdhury *et al.*, 2014), tecnológicos (p.e. nivel de precisión, nivel Abney, teodolito mecánico y electrónico, nivel electrónico, estación total, escáner laser terrestre, sistema de aeronaves pilotadas a distancia y receptores GPS diferenciales); (Calkins & Yule, 1927; Morton *et al.*, 1993; Huang *et al.*, 2002; Klemas, 2011; Labuz, 2016; Moloney *et al.*, 2018).

Dada la gran variedad de los métodos utilizados para la Medición de Perfiles de Playas (MPP) se hipotetiza que, al realizar una evaluación técnica, operativa y económica entre ellos, esta estará directamente relacionada con la naturaleza de los métodos (manuales y tecnológicos).

Cuando se está en un contexto de investigación científica, la medición y los mecanismos utilizados para realizarla se convierten en un asunto de gran relevancia para poder alcanzar los objetivos de dicha investigación (Mendoza & Garza, 2009), es por ello que en este trabajo se realizará un análisis comparativo de los diferentes Métodos de Medición de Perfiles de Playas (MMPP), en función de criterios técnicos, operativos y

económicos utilizando el método de proceso analítico jerárquico, el cual permite realizar múltiples comparaciones de diferentes alternativas y, a partir de procedimientos matemáticos priorizarlas.

Este es un trabajo novedoso a nivel científico por ser el primer esfuerzo que describe los diferentes MMPP y hace una evaluación comparativa en términos de criterios técnicos, operativos y económicos de cada uno de ellos, además incluye mediciones *in situ* para corroborar el desempeño concerniente a cada método. Asimismo, servirá de base para la construcción de equipos más versátiles para la MPP y como guía a la hora de decidir qué método usar de acuerdo a los recursos disponibles y a las características morfológicas de la zona que se desea estudiar.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Analizar los diversos MMPP, a partir de su evaluación técnica, operativa y económica.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar el estado del arte respecto a la MPP.
- Establecer factores técnicos, operativos y económicos de cada método identificado, a partir de matrices comparativas.
- Evaluar la factibilidad técnica y económica de los MMPP disponibles en el mercado colombiano.
- Probar la operatividad y precisión de cada método en campo.

4. MARCO TEÓRICO

La playa está definida como la acumulación de sedimento no consolidado (arena, grava o canto rodado) que está situado entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva y una profundidad que corresponde a la zona donde no se produce un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje.

4.1 Perfil de playa

Se entiende por perfil de playa o sección transversal a la medida exacta o muy aproximada de la inclinación y del ancho de la playa, y cuando se tienen datos de una

serie de tiempo larga, permiten conocer si en la playa se están presentando fenómenos de acreción, erosión o si se encuentra en equilibrio (Unesco, 2012).

El perfil de playa (*Figura 1*) puede presentar morfologías variadas a lo largo de la costa. Sin embargo, todos los perfiles mantienen una tendencia general similar, y claramente se puede evidenciar que en la zona cercana a la línea de costa la pendiente es mayor y empieza a disminuir progresivamente hacia mar adentro (Bernabéu *et al.*, 2001).

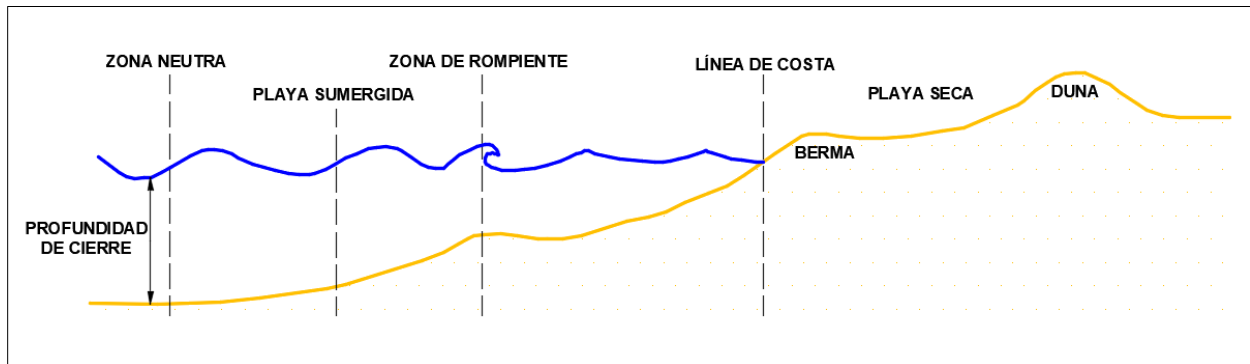


Figura 1. Perfil de playa.

4.2 Profundidad de cierre

En un perfil de playa, la profundidad de cierre (*Figura 1*) está definida como la zona de la playa en que no se producen movimiento de sedimentos por acción del oleaje. En otras palabras, es la profundidad a partir de la cual la hidrodinámica litoral no actúa de manera significativa sobre los sedimentos, por lo cual las variaciones verticales del perfil son pequeñas o casi nulas.

Cuando se llevan a cabo estudios a largo plazo para el análisis de estabilidad de playa, usualmente se utiliza la “profundidad de cierre” como un límite de la aplicación del perfil de equilibrio. Dicha profundidad está relacionada con el transporte de sedimentos y hace alusión a la posición de la parte emergida del perfil en la cual las fluctuaciones son tan reducidas que no son distinguibles de los errores de la medida (Andrade & Pinzón, 2011).

La estimación de la profundidad de cierre es relevante a la hora de organizar y planificar proyectos en la zona costera, ya que delimita las zonas preferentes para extracción de material o vertido de sedimentos. Además, es un factor que se tiene en cuenta en el diseño de obras de ingeniería costera, como espolones o diques (de la Peña *et al.*, 2004).

Muchas veces con los MMPP acá expuestos no se alcanza dicha profundidad debido a que se requiere complementar con métodos batimétricos, sin embargo, con los métodos topográficos (manuales y tecnológicos) se alcanza a cubrir una importante parte de la franja costera de mayor variación. No obstante, Hallermeier (1981) planteó una aproximación analítica para predecir el valor anual de la profundidad de cierre, que puede ser generalizada de una forma dependiente del tiempo:

$$h^* = 2.28 \cdot H_{e,t} - 68.5 \cdot \left(\frac{H_{e,t}^2}{g \cdot T_{e,t}^2} \right) \quad (1)$$

donde h^* es la profundidad de cierre durante t años, $H_{e,t}$ es la altura de ola significativa (antes de la rotura) que es excedida 12 horas por t años, $T_{e,t}$ es el periodo asociado y g es la aceleración debida al efecto de la gravedad.

4.3 Playas reflejantes

El estado de playa reflejante constituye el final de la secuencia de acreción, donde la barra se ha integrado completamente con el frente de playa formando parte de la berma; este tipo de playa presenta poca variabilidad longitudinal y es frecuente que su frente es estrecho y de gran pendiente que generalmente termina en un escalón compuesto por materiales más gruesos después del cual la pendiente del perfil baja considerablemente. Suele presentarse una berma muy desarrollada o, bajo condiciones más energéticas, cups rítmicos y pronunciados (Gutiérrez, 2011).

4.4 Playas disipativas

Las playas disipativas se caracterizan por tener pendientes suaves ($\pm 2^\circ$) a lo largo de todo el perfil con una o más barras con senos y crestas poco marcados, que contribuyen a la disipación del oleaje. Presentan pequeños gradientes batimétricos que favorecen la rotura en descrestamiento (*spilling*), lo que provoca que la energía del oleaje se disipe de manera progresiva y da lugar a una ancha zona de rompientes. Las playas disipativas suelen tener una zona de swash muy ancha y una altura de ola en el frente de playa muy pequeña, debida a la eficiente disipación sufrida por el oleaje a medida que avanza (Gutiérrez, 2011). En este tipo de playa se evidencia una morfología bidimensional y un perfil tendido, sobre el cual se presentan una o más barras longitudinales, ubicadas de forma paralela a la línea de costa (Vidal *et al.*, 1995).

En cuanto a la magnitud de la velocidad en los ciclos de “*swash*” se presentan diferencias que dependen principalmente del estado de la playa (reflejante y disipativa), se ha encontrado que durante el “*uprush*” y el “*backrush*”, las velocidades son mayores en

playas reflejantes que en playas disipativas, debido a la mayor pendiente (Montaño-Muñoz *et al.*, 2018)

4.5 Morfología de playas

La morfología de la playa se refiere al estudio de la interacción y el ajuste entre la batimetría, la hidrodinámica marina cercana a la costa, las geoformas del fondo marino y la dinámica del transporte de sedimentos. Siendo los procesos hidrodinámicos; olas, mareas, corrientes inducidas por el oleaje y en menor medida por el viento quienes dominan en gran medida la morfología de la playa (Short, 1999).

Las playas se encuentran enmarcadas dentro de la zona costera, que comprende el área de la plataforma continental y de la costa en la que los procesos morfodinámicos están determinados por la dinámica marina. Su desarrollo hacia tierra y hacia el mar depende, por lo tanto, de la tipología de la costa, de la plataforma continental, y del clima marítimo de la zona (CEPAL-NU, 2012).

La playa cambia continuamente debido a muchos factores que se simplifican en naturales y antrópicos. Es por ello que es importante ejecutar un constante monitoreo de esta zona con el fin de conocer los cambios de relieve que se están generando y la forma que está adoptando la playa como el resultado del origen geológico, el tamaño del sedimento, la energía del oleaje, los fenómenos meteorológicos, corrientes marinas y la intervención antrópica.

4.5.1 Berma

Se define como la zona de la playa seca formada por la acumulación de sedimento debido a la acción del oleaje. En el lado hacia el mar se observa un cambio brusco en la pendiente conformando el frente de playa. Cuando, posterior a una temporada de gran actividad del oleaje ocurre un periodo de calma una nueva berma “berma de verano” se puede añadir a la anterior, o “berma de invierno”, con una altura inferior a la “berma de verano” que la antecede, debido a que el ascenso del oleaje es inferior (Gómez, 2012).

El perfil de las playas varía en el espacio y en el tiempo como respuesta a los cambios del transporte transversal de los sedimentos producido por la dinámica marina, principalmente el oleaje, que se reflejan en desplazamientos de las barras y las bermas.

4.5.2 Barras de arena

Son acumulaciones de arena en forma de cresta y presentan un surco asociado que se sitúa hacia tierra, tienden a ser paralelas a la línea de costa y se encuentran separadas de esta en la zona infralitoral y, por tanto, sumergidas (Guillén & Díaz, 1990). Los principales mecanismos responsables de la formación de las barras se encuentran controlados por la velocidad orbital del oleaje incidente y subordinadamente, por acción de corrientes longitudinales y de retorno (Greenwood & Davidson-Arnott, 1975).

Las barras constituyen un papel fundamental en el sistema morfodinámico, por cuanto son un reservorio de sedimento que puede ser suministrado al resto del perfil litoral.

4.6 Unidad Ambiental Costera (UAC)

La problemática y el deterioro de la zona costera instó a la generación de la Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia (PNAOCI), la cual establece a los ecosistemas marinos y costeros como base para su manejo y se fundamenta en el Decreto 1120 de 2013, *“por el cual se reglamentan las Unidades Ambientales Costeras (UAC) y las comisiones conjuntas, se establecen las reglas de procedimiento y criterios para reglamentar la restricción de ciertas actividades en pastos marinos, y se dictan otras disposiciones”*.

Localmente, la Unidad Ambiental Costera del Darién (UAC-Darién), se ubica en el extremo Occidental de la costa Caribe colombiana en límite con Panamá, abarcando todo el territorio marino y costero desde cabo Tiburón en el departamento de Chocó hasta punta del Rey en Antioquia. Administrativamente se encuentra bajo la jurisdicción de CORPOURABÁ y CODECHOCÓ (INVEMAR *et al.*, 2008).

4.7 Proceso Analítico Jerárquico (PAJ)

Es un método comparativo de múltiples alternativas en función de criterios normalmente jerarquizados, los cuales suelen entrar en conflictos. En cuanto a su estructura jerárquica (de arriba abajo), el objetivo final se ubica en el nivel superior, y los criterios y subcriterios (si aplica) en los niveles inferiores (*Figura 2*). Uno de los aspectos fundamentales que se deben tener en cuenta cuando se aplique este método, es elegir bien los criterios y subcriterios de selección, definirlos adecuadamente, garantizando que sean mutuamente excluyentes.

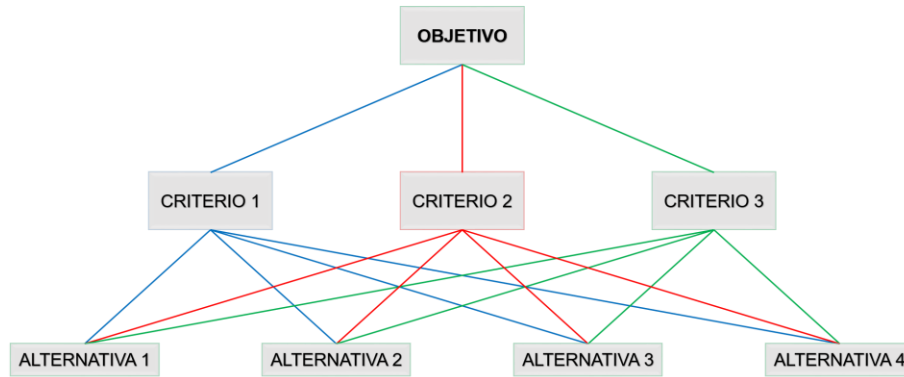


Figura 2. Ejemplo de estructura jerárquica. Modificado de Saaty (1980).

Cuando se realiza la comparación entre las diferentes alternativas respecto a cada uno de los criterios se obtiene una matriz cuadrada que recibe el nombre de matriz de decisión, teniendo en cuenta una escala fundamental de comparación (*Tabla 1*). Dicha matriz cumple con propiedades de (i) reciprocidad (si $a_{ij} = x \rightarrow a_{ji} = 1/x$), (ii) homogeneidad (si i y j son igualmente importantes, $a_{ij} = a_{ji} = 1$, además, $a_{ji} = 1 \forall i$), y (iii) consistencia.

Tabla 1. Escala fundamental de comparación pareada.

Valor	Definición	Comentarios
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Importancia moderada	El juicio y la experiencia previa favorece a un elemento frente al otro.
5	Importancia grande	El juicio y la experiencia previa favorece fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Importancia muy grande	El elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica.
9	Importancia extrema	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2,4,6 y 8	"Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar"	

Modificado de Saaty (1980)

Una vez completada la matriz y cumplidas las propiedades (i) y (ii), se prosigue a verificar su consistencia mediante el Índice de Consistencia (*IC*):

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

donde: λ_{max} es el máximo autovalor, n es la dimensión de la matriz de decisión. Cuando se obtiene $IC = 0$, indica que la consistencia es completa. Habiendo calculado el IC , se calcula la proporción de consistencia (RC), la cual es la proporción entre el IC y el índice aleatorio (IR), donde IR se obtiene a partir de la *Tabla 2*.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (3)$$

Tabla 2. Índice aleatorio.

Tamaño de la matriz (n)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Índice aleatorio (IR)	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.57	1.59

Tomado de Saaty (1980)

De acuerdo con los resultados de la RC , se aceptan los resultados siempre que no supere los valores de la *Tabla 3*.

Tabla 3. Porcentajes máximos de proporción de consistencia.

Tamaño de la matriz (n)	Proporción de consistencia (RC)
3.00	5%
4.00	9%
≥5	10%

Tomado de Saaty (1980).

Una vez verificada la consistencia, se calculan los pesos, que representan la importancia de las diferentes alternativas respecto a un determinado criterio, utilizando el método de los autovalores resolviendo la siguiente ecuación:

$$A * W = \lambda_{max} * W \quad (4)$$

donde A representa la matriz de comparación, W el autovector y λ_{max} el autovalor.

4.8 Parámetros estadísticos

4.8.1 Coeficiente de correlación de Pearson (r)

Es una medida de la asociación que mide la dirección y el grado de la relación lineal entre dos variables cuantitativas (Moore, 2007). Está descrito por la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

donde: x son los valores observados, y los valores predichos, y \bar{x} e \bar{y} son el valor medio para x e y respectivamente.

El coeficiente de correlación de Pearson varía entre -1 a 1. El signo indica si la dirección es positiva o negativa y el valor hace referencia a la fuerza de la relación entre las variables. Los valores pueden ubicarse en intervalos para mejor comprensión (*Tabla 4*).

Tabla 4. Descripción de "r" por intervalos.

Intervalo de "r"		Descripción
± 0.96	± 1.00	Correlación perfecta
± 0.85	± 0.95	Correlación fuerte
± 0.70	± 0.84	Correlación significativa
± 0.50	± 0.69	Correlación moderada
± 0.20	± 0.49	Correlación débil
± 0.10	± 0.19	Correlación muy débil
± 0.09	± 0.00	Correlación nula

Tomado de Pérez-Tejada (2008).

4.8.2 Coeficiente de determinación (r^2)

Es una medida estadística que permite cuantificar que tan cerca se encuentran los datos medidos de una línea de regresión ajustada. En general, cuanto más alto sea el r^2 , mejor es el ajuste del modelo a los datos medidos y se puede obtener al elevar al cuadrado e coeficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente r^2 puede variar de 0 a 1, donde $r^2 = 0$ indica que no existe relación entre las variables y $r^2 = 1$ indica que existe una relación perfecta.

4.8.3 Error Cuadrático Medio (RMSE)

Es una forma estándar para medir el error de un modelo de predicción de datos cuantitativos indicando el ajuste del modelo a los datos, o sea, cuán cerca están los datos observados de los valores predichos del modelo. Tiene la propiedad útil de estar en las mismas unidades que las variables medidas y valores bajos indican un mejor ajuste. Formalmente se define de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

donde: y_i son los valores observados, \hat{y}_i son los valores predichos y n es el número de observaciones.

5. ÁREA DE ESTUDIO

5.1 UAC-Darién

El golfo de Urabá se encuentra localizado en el extremo occidental de la costa Caribe colombiana entre las latitudes 7° 54' - 8° 40' N y longitudes 76° 53' - 77° 23' W (*Figura 3*) y constituye el segundo rasgo geográfico destacado, después de la península de la Guajira, con 25 km de ancho y 80 km de largo. Desde un punto de vista geomorfológico, en general, se pueden encontrar cuatro sectores homogéneos: (i) Cabo Tiburón-Boca Tarena, con costas limitadas por colinas montañosas, acantilados, playas de bolsillo y formaciones coralinas; (ii) Boca Tarena-Río Turbo, con tierras bajas de piedemonte, el delta del Atrato, cordones y canales; (iii) Río Turbo-Punta Caribaná, con colinas y terrazas emergidas, costas bajas con acumulación reciente de sedimentos y (iv) Punta Caribaná-Arboletes, con acantilados conformados por terrazas marinas de diferente altura (Arboletes-Mulatos) y un llano costero de Mulatos a Caribaná (INVEMAR *et al.*, 2008).

5.2 Playa Dulce (Turbo)

Turbo es un distrito de Colombia localizado en la subregión de Urabá al norte del departamento de Antioquia. Está ubicado sobre la margen del mar Caribe. Playa Dulce, ubicada al occidente del casco urbano, es una playa urbana recién formada en 2015 por el cierre de la espiga litoral (punta Yarumal) que ha progradado cerca de 1.5 km desde la actual desembocadura del río Turbo posterior a su desviación en 1958, y se unió a la anterior playa Barajas, una costa en proceso de erosión por déficit de sedimento desde dicha desviación del río (Alcántara, *et al.*, 2019).

La playa es disipativa, con pendientes de $\pm 2^\circ$ aproximadamente y dominada por arenas finas y medias. Además, su ubicación al interior del golfo de Urabá la protege de oleajes fuertes.

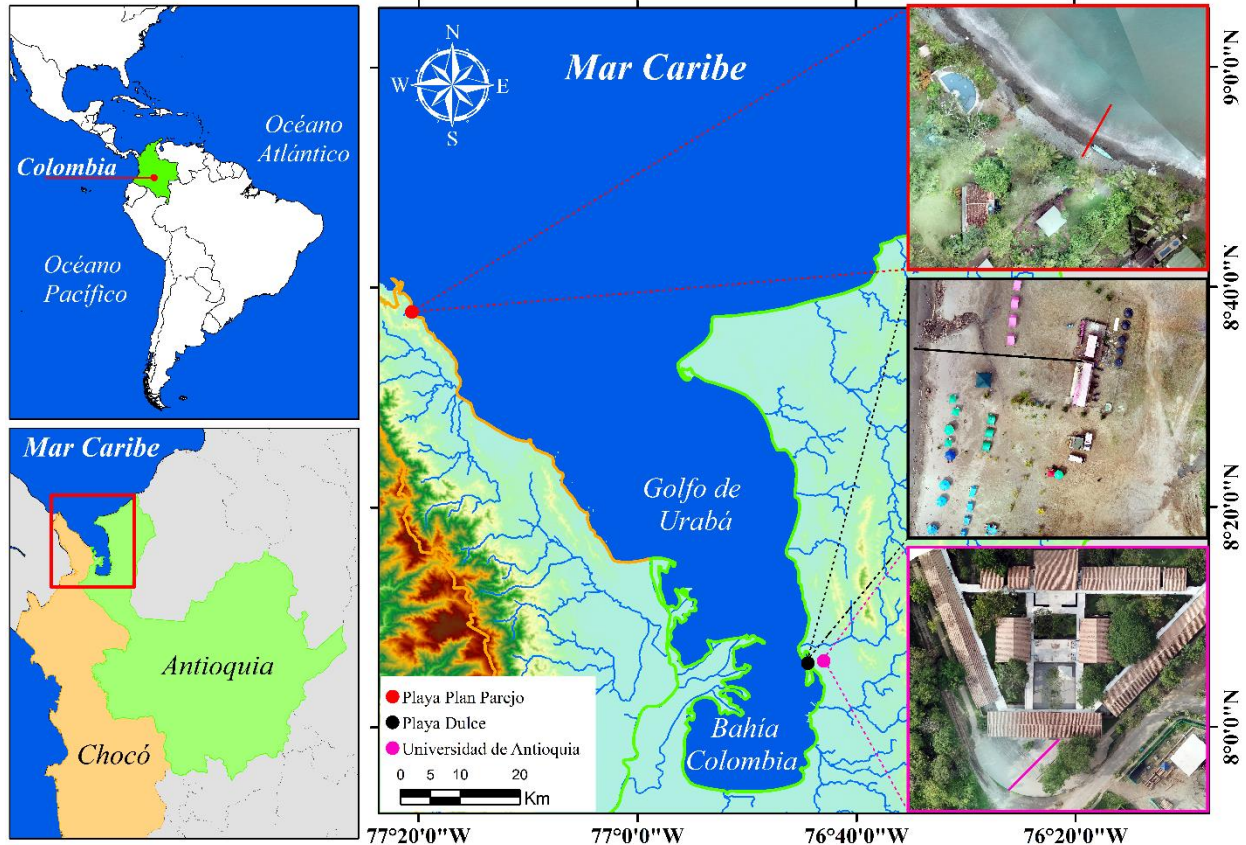


Figura 3. Mapa del golfo de Urabá. Los puntos establecen la ubicación de las zonas donde fueron medidos los perfiles de playa y se muestran unidos por líneas punteadas a fotografías asociadas a cada una de ellas.

5.3 Playa Plan Parejo (Acandí)

Acandí es un municipio colombiano ubicado en el extremo norte del departamento de Chocó, al noroccidente de Colombia, a orillas del mar Caribe en el costado occidental del golfo de Urabá-Darién. Uno de los atractivos turísticos más conocidos de Acandí es el corregimiento de Capurganá, apreciado por la belleza de sus playas en inmediaciones de la selva de la serranía del Darién, que junto con los sedimentos basálticos y las arenas coralinas de la bahía dan origen a playas mixtas compuestas como lo es Plan Parejo.

Esta playa cuenta con una longitud aproximada de ± 700 m, un ancho aproximado de ± 12 m, una pendiente aproximada de $\pm 9.5^\circ$ y con sedimentos conformados principalmente por cantos rodados (Boulder), generalmente de forma redondeada, pues, aunque su origen, el río Capurganá, desemboca en la playa, el retrabajo por acción del oleaje es altamente significativo. Debido al tipo de sedimentos tan gruesos (> 64 mm) se generan pendientes fuertes a lo largo de toda la playa.

6. METODOLOGÍA

Los métodos utilizados para esta investigación se basaron en criterios de rigurosidad y actualidad de acuerdo al estado del arte. Para la comparación entre los MMPP se establecieron diferentes factores técnicos, operativos y económicos. La selección de estos factores buscó que la evaluación fuera robusta y suficiente para lograr los objetivos de la investigación. Para ello se realizaron 5 etapas:

1. Revisión documental de los MMPP.
2. Definición de factores técnicos, operativos y económicos.
3. Verificación en campo de operatividad y precisión de cada método.
4. Comparación de los MMPP con el método PAJ.
5. Análisis estadístico de correlaciones.

6.1 Etapa 1: Revisión documental de los MMPP

La revisión bibliográfica en diferentes bases de datos, repositorios académicos (p.e. Tesis), normas técnicas, páginas web de empresas dedicadas a la MPP permitió establecer un listado de los diferentes métodos utilizados para este tipo de mediciones.

Se revisaron 177 publicaciones, de las cuales 153 se encuentran publicados en la revista “*Journal of Coastal Research*” y los demás en revistas como *Ciencias Marinas*, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *Coastal Engineering*, *Geomorphology*, *Revista Académica Ingeniería*, *Marine Geology*, *Revista Investigaciones Marinas*, *Tecnologías y Ciencias del Agua*, *Latin American Journal Sedimentology and Basin Analysis*, *Lámpsakos*, *Earth Surface Processes and Landforms*, *Geosciences*, *Cuadernos de Investigación Geográfica* y *Journal of Geographic Information System*.

A partir de esta revisión se lograron identificar 15 métodos diferentes (los nombres de cada uno fueron adaptados de acuerdo a su nombre comercial y otros según el autor del artículo publicado):

- | | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| 1. Método_Emery | 9. Método_Teodolito-Mecánico |
| 2. Método_Delgado&Lloyd | 10. Método_Teodolito-Electrónico |
| 3. Método_Andrade&Ferreira | 11. Método_Estación-Total |
| 4. Método_Chowdhury | 12. Método_DGPS |
| 5. Método_Puleo | 13. Método_RPAS |
| 6. Método_Nivel-Abney | 14. Método_Escáner-Laser-Terrestre |
| 7. Método_Nivel-Óptico | 15. Método_Ecosonda |
| 8. Método_Nivel-Electrónico | |

6.2 Etapa 2: Definición de factores técnicos, operativos y económicos.

Con el fin de poder analizar los métodos identificados desde diferentes perspectivas, se definieron tres factores, los cuales permiten mostrar de forma ordenada, clara y concisa las ventajas, desventajas, similitudes y diferencias de cada uno. Los factores tenidos en cuenta se describen a continuación:

1. *Factores Técnicos (FT)*: Al evaluar cada método respecto a este tipo de factor, se tuvieron en cuenta sus características principales, los accesorios que lo componen y la precisión al realizar las mediciones.
2. *Factores Operativos (FO)*: Este factor se tuvo en cuenta para evaluar la complejidad que implica el uso de cada método en el momento de realizar las mediciones, el número mínimo de personal requerido, formato de recolección, cantidad de datos y dificultad en el procesamiento de los mismos.
3. *Factores Económicos (FE)*: El factor económico en muchas ocasiones actúa como limitante a la hora de la elección de un método u otro para realizar mediciones, por ello se evaluó el costo necesario para poder adquirir cada uno de los métodos, además de los costos asociados por materiales adicionales y personal de trabajo.

Estos tres factores se encuentran estrechamente relacionados y son de gran importancia porque al permitir clasificar objetivamente las fortalezas y debilidades de cada método, ayudan de base para la elección acertada de un MMPP a emplear en un proyecto/actividad de acuerdo con las exigencias del mismo.

6.3 Etapa 3: Verificación en campo de operatividad y precisión de cada método.

Con la finalidad de comprobar la operatividad y precisión de cada uno de los métodos identificados, se realizaron mediciones en tres lugares diferentes. El primero, fue un perfil de control en la Universidad de Antioquia - sede Ciencias del Mar (UdeA), donde se podían realizar múltiples mediciones, ya que al estar construido en concreto se garantizaba la baja variabilidad durante el tiempo de las mediciones. Los otros dos lugares fueron playa Plan Parejo en Acandí y playa Dulce en Turbo. Estas playas fueron seleccionadas porque presentan diferentes características tales como granulometría, oleaje y tipo de playa, dado que es importante conocer la respuesta de cada método frente a diferentes ambientes (*Tabla 5*).

Tabla 5. Características de las playas de estudio.

Playa	Tipo de sedimento	Tipo de playa				Altura de ola (m)	
		Urbana	Rural	Disipativa	Reflejante	Época seca	Época húmeda
Playa Dulce	Arenas finas y medias	X		X		1.4	0.4
Playa Plan Parejo	Gravas y cantos rodados		X		X	1.5	0.7

Las primeras mediciones se realizaron en el perfil de control en la UdeA en los días 17 y 18 de octubre de 2020, que dadas las condiciones de éste en cuanto al material en que estaba construido (concreto) se podía garantizar que la variabilidad durante el tiempo de las mediciones sería nula.

Sobre dicha superficie, se llevaron a cabo las mediciones con 9 de los 15 métodos identificados en la etapa 1. Para ello se definió un punto de partida común y la dirección/rumbo que tendrían los perfiles a medir. Adicionalmente, se establecieron 6 puntos de control a lo largo del perfil para ser utilizados en la etapa de procesamiento. Por otro lado, con el fin de tener mayor criterio para elegir el método “más preciso”, que sería a partir del cual se realizarían las comparaciones, se midió con una cinta métrica, la distancia a la que se encontraban los 6 puntos respecto al punto de inicio/referencia.

Posteriormente, se llevaron a cabo dos campañas de medición en cada una de las playas escogidas con el fin de realizar las mediciones con cada uno de estos métodos, en las cuales también se definió un punto de partida común e igual dirección para los perfiles, con sus respectivos puntos de control. En ambas playas se definió la dirección que tendrían los perfiles de acuerdo a la línea de costa, de forma tal, que este quedase de forma perpendicular a ella.

En cada una de las playas escogidas se garantizó que las mediciones con los diferentes métodos fueran realizadas por el mismo lugar o línea de referencia, para que fuese posible realizar las comparaciones entre cada uno de los métodos. Por otro lado, teniendo en cuenta que las playas son ambientes muy cambiantes, producto de la dinámica oceanográfica y climatológica, además del paso de personas por la zona donde se realizaban las mediciones, se garantizó que estas fuesen realizadas con todos los métodos en un mismo día en cada playa, 21 de noviembre de 2020 en playa Dulce y 25 del mismo mes y año en playa Plan Parejo, y de esta manera, disminuir el error que

podiese presentarse por las variaciones naturales que ocurrirían de forma natural por el oleaje y la marea a lo largo del tiempo.

6.4 Etapa 4: Comparación de los MMPP con el método PAJ

La comparación de los diferentes MMPP se realizó mediante el método PAJ y para ello se definieron 3 criterios de evaluación (factores técnicos, factores operativos y factores económicos) para elegir entre 15 alternativas que correspondieron a los 15 métodos identificaos en la revisión documental.

Posteriormente, se realizaron cuatro evaluaciones de los criterios de evaluación. En la primera, se le asigno igual importancia a cada criterio y en las otras tres se le asigno importancia extrema a un criterio mientras los otros dos presentaban igual importancia entre sí. Luego, se crearon las matrices de decisión para cada uno de los criterios y se rellenaron teniendo en cuenta la escala fundamental de comparación (*Tabla 1*) y que se cumplieran las propiedades de reciprocidad, homogeneidad y consistencia.

Finalmente, se calcularon los pesos, que representan la importancia de las diferentes alternativas respecto a un determinado criterio, utilizando el método de los autovalores para conocer la priorización de las diferentes alternativas de acuerdo a cada uno de los tres criterios tenidos en cuenta.

6.5 Etapa 5: Análisis estadístico de correlaciones

Para el análisis estadístico de correlaciones se definió el Método_Estación-Total como método base, sobre el cual se realizaron todas las comparaciones, analizando el grado de correlación entre los valores medidos con él y los valores medidos con los demás métodos.

Dado que en campo se hacía muy difícil controlar de manera precisa el tamaño de paso entre cada medición, se realizó un filtrado de los datos medidos con los diferentes métodos de manera que el valor medido en la horizontal (distancia) correspondiera al valor medido con el Método_Estación-Total o al menos presentara una diferencia menor o igual a diez centímetros ($\Delta L < 0.10 \text{ m}$), ya que en esta distancia la variación en la vertical (elevación) del perfil es mínima.

Una vez realizado el filtrado, se garantizó que cada valor de la elevación medida con el Método_Estación-Total iba a ser el mismo medido con los otros métodos y, al compararse la misma variable se tendría un comportamiento lineal. De esta manera, se organizaron los datos y se calcularon los parámetros estadísticos (r , r^2 y RMSE) para

medir el grado de correlación entre los datos medidos por cada método comparado con el Método_Estación-Total y el error presente.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir de la metodología aplicada se obtuvieron diferentes resultados, tanto de la parte teórica, práctica y analítica. Desde el punto de vista teórica, se realizó una compilación de todos los métodos encontrados en la revisión bibliográfica. La aplicación práctica se realizó con 9 de los 15 métodos, debido a que no se contaba con la disponibilidad presupuestal para adquirir todos los equipos. Finalmente, la parte analítica permitió obtener dos tipos de resultados respecto a los tres factores de evaluación planteados para esta investigación (técnicos, operativos y económicos).

7.1 Métodos de medición de perfiles de playa

Como resultado de la revisión documental, se identificaron 15 métodos de los cuales se aplicaron 9 en campo (*Tabla 6*). Los métodos fueron clasificados como manuales y tecnológicos, de manera que se pudieran diferenciar aquellos que el evaluador puede construir por su propia cuenta y aquellos que debe adquirir en el mercado. A continuación, se describen los métodos mencionando su autor o diseñador, el nombre comercial, la cantidad de personal requerido para su utilización, forma de manejo, esquema visual del método, entre otros.

Tabla 6. Clasificación de los métodos manuales, tecnológicos y aplicados en campo.

Métodos	Manual	Tecnológico	Aplicado en campo
Método_Emery	X		X
Método_Delgado&Lloyd	X		X
Método_Andrade&Ferreira	X		X
Método_Puleo	X		X
Método_Chowdhury	X		
Método_Nivel-Abney		X	
Método_Nivel-Óptico		X	X
Método_Nivel-Electrónico		X	
Método_Teodolito-Mecánico		X	
Método_Teodolito-Electrónico		X	X
Método_Estación-Total		X	X
Método_DGPS		X	X
Método_RPAS		X	X
Método_Escáner-Láser-Terrestre		X	
Método_Ecosonda		x	

7.1.1 Método_Emery

El método fue desarrollado por el científico K. O. Emery en el año 1961 y es considerado uno de los métodos más sencillos para hacer MPP. El equipo requiere como mínimo de dos personas para su uso, está compuesto por dos varas graduadas (i) “Tierra” (vara más cercana al punto de inicio del perfil) y (ii) “Mar” (vara más alejada al punto de inicio del perfil). Además, en la parte debajo de cada vara se agrega una base plana para evitar que se hunda en la arena (*Figura 4*).

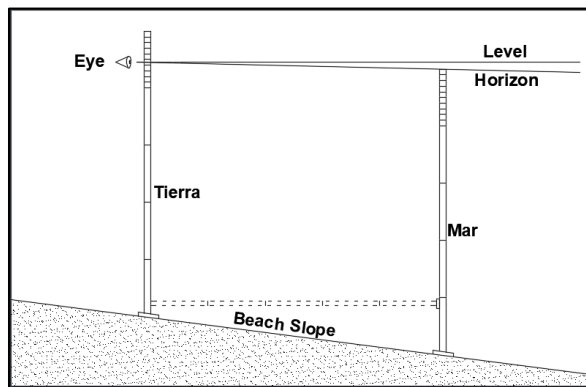


Figura 4. Esquema-Método_Emery. Modificado de: Emery, 1961.

En uso, la vara *Tierra* se mantiene de forma vertical a una distancia de la vara *Mar* sobre la “línea” donde se desea realizar el perfil. El observador es quien sostiene la vara *Tierra* y debe alinear su ojo con la parte superior de la vara *Mar* y el horizonte, y realiza la lectura de altura leyendo la intersección en la vara *Mar*. Luego, se debe apuntar en una tabla de registros la distancia entre las varas (x) y la altura observada (z). Para continuar el perfil, la vara *Tierra* se mueve a la posición de la vara *Mar*, y esta a su vez, se mueve a una distancia de la vara *Tierra* en el sentido del perfil que se está midiendo, vuelve y realiza la lectura y se registran en la tabla la altura y distancia. La sucesión de estos pasos se realiza hasta completar el perfil. Finalmente, se suman las diferencias de cota y se grafican contra la distancia horizontal para obtener un perfil en todo el ancho de la playa.

7.1.2 Método_Delgado&Lloyd

Solo se necesitan dos herramientas para obtener los datos aplicando este método y las mediciones pueden ser desarrolladas por una sola persona o más. La primera herramienta es una escuadra que consiste en una varilla horizontal unida en un extremo con una varilla vertical, en un ángulo perfecto de noventa grados. Además, se debe agregar un nivel y una brújula en el extremo suelto. La segunda herramienta es una varilla vertical graduada con un nivel para poder garantizar que la vara se ubique de manera vertical (*Figura 5*).

Para su uso, se establece la dirección del perfil fijándola desde el primer punto con la brújula. Esto se puede seguir si se dibuja una “línea imaginaria” en la arena con dos marcas. La escuadra debe colocarse en la dirección del perfil, con el extremo fijo hacia el mar y la varilla vertical apoyada en la arena. Esta última también indica el punto de partida para la siguiente medición. La varilla horizontal de la escuadra se ajusta mediante el nivel circular y una vez está en una posición horizontal “perfecta”, la altura se registra en el extremo suelto utilizando la vara vertical y se anota en la tabla de registro. La repetición de la secuencia completará el perfil de la playa.

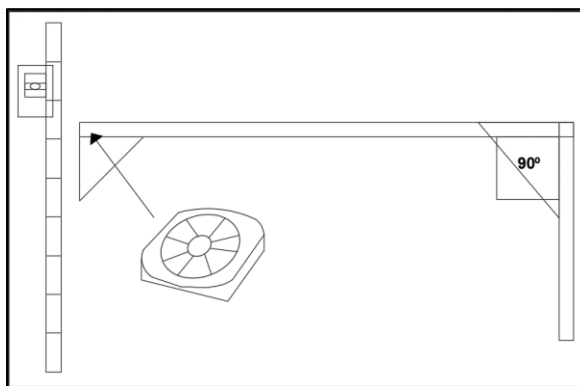


Figura 5. Esquema-Método_Delgado&Lloyd. Modificado de: Delgado & Lloyd, 2004.

7.1.3 Método_Andrade&Ferreira

El método propuesto por Andrade y Ferreira en el año 2006 está basado en el principio físico de vasos comunicantes, y básicamente consiste en medir, de manera secuencial, las diferencias de elevación en el agua que se encuentra contenida en una manguera sujeta a dos varas graduadas (*Figura 6*).

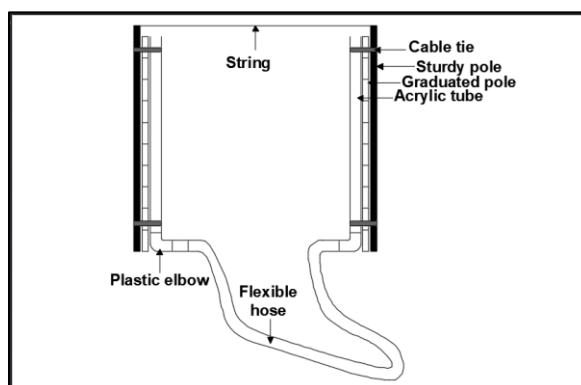


Figura 6. Esquema-Método_Andrade&Ferreira. Modificado de: Andrade & Ferreira, 2006.

Para poder hacer uso de este método se requiere la operación de mínimo dos personas. En primer lugar, se llena la manguera hasta un nivel conveniente (aproximadamente la mitad de la altura de las varas), medido en ambas varas ubicadas de manera vertical, una al lado de la otra. Se debe garantizar que no queden burbujas de aire atrapadas para asegurar el libre movimiento del agua al interior de la manguera y así minimizar el error en las lecturas.

El perfil se comienza desde el punto de referencia y su rumbo se puede definir con una brújula. Las varas se sostienen verticalmente sobre la línea del perfil y la distancia entre ellas se define por la longitud de una cuerda atada a la punta de ambas varas. Tan pronto como se establece el nivel de agua en las varas se deben realizar las lecturas en cada una. Las lecturas emparejadas resultantes se deben anotar en una tabla de registro, asegurándose siempre que el orden de las lecturas se mantenga constante (p.e. “Tierra”, vara más cercana al punto de inicio del perfil y “Mar”, vara más alejada al punto de inicio del perfil).

Los operarios avanzan a lo largo de la línea del perfil intercambiando posiciones sucesivamente a medida que avanzan. La última lectura se realiza cuando la vara más alejada se encuentre parcialmente sumergida.

7.1.4 Método_Chowdhury

El método fue propuesto por Chowdhury y sus colaboradores en el año 2014, respecto al principio físico y composición del equipo el método es similar al Método_Andrade&Ferreira, ya que también utiliza el principio físico de vasos comunicantes que consiste en medir el nivel del agua en un tubo en forma de “U” sujeta a dos varas graduadas. La principal diferencia es su potencial de conversión en una herramienta de lectura única para una persona, ya que en la escala de medida que se encuentra en la vara “Mar” se observan los valores correspondientes a la diferencia de alturas entre las dos varas, y también su adaptabilidad y aplicabilidad a costas blandas y fangosas donde otros equipos no pueden sostenerse firmemente en el suelo sin hundirse en el barro (*Figura 7*).

Para poder hacer uso de este método se aplica la misma metodología del Método_Andrade&Ferreira descrita anteriormente, con la variación de que solo se realiza la lectura de elevación mostrada en la vara “Mar”, porque es la que cuenta con la escala modificada.

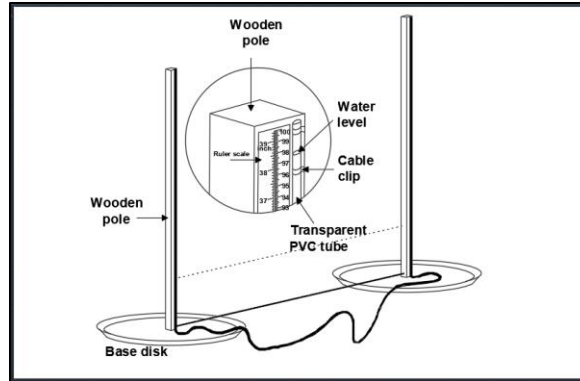


Figura 7. Esquema-Método_Chowdhury. Modificado de Chwhury *et al.*, 2014.

7.1.5 Método_Puleo

El método fue propuesto y desarrollado por Puleo *et al.*, (2008) como un método de bajo costo utilizado para realizar MPP. El perfilador utiliza un material de peso ligero construido en forma del símbolo numeral "#". Para la verticalidad del perfilador, se agrega un nivel de burbuja a la vara delantera, la cual cuenta con gradaciones para medir la diferencia de elevación entre ambas varas a través de un brazo móvil con un nivel de burbuja o con una escuadra móvil que garantiza la formación de un triángulo rectángulo de hipotenusa constante (p.e. 1 m), tal como se muestra a continuación en la *Figura 8*.

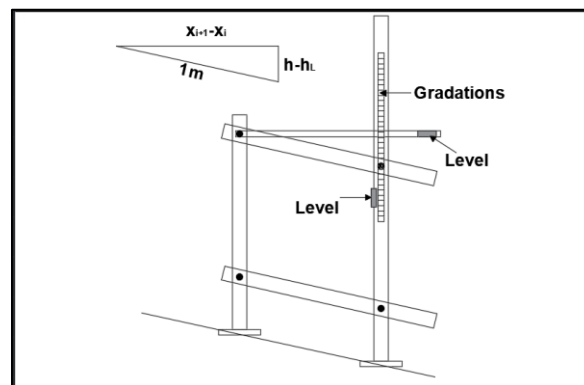


Figura 8. Esquema-Método_Puleo. Modificado de: Puleo *et al.*, 2008.

La barra de nivel está unida a la vara trasera por un solo perno y se deja libre para girar. Cuando está nivelado, la intersección de la barra de nivel con las gradaciones en la vara delantera indica el desplazamiento vertical. Se recomienda ubicar las gradaciones de modo que cuando el brazo esté nivelado dé una lectura de cero, y que presente gradaciones en ambos sentidos en caso de encontrarse con dunas o bermas que implicaran tanto pendientes positivas como negativas.

Basta al menos de una persona para poder usar el método. En primer lugar, se define el punto de inicio, ahí se ubica la vara trasera del perfilador y la vara delantera a lo largo de la línea del perfil. Una vez que el nivel de la vara se estabiliza, se mueve la barra de nivel hasta que el nivel horizontal esté nivelado o escuadrado a 90° respecto a la vara delantera, tras su confirmación, se realiza la medición en las gradaciones y se anota en la tabla de registro. Luego, el perfilador se levanta y se mueve de manera que la vara trasera se coloque en la ubicación anterior de la delantera, vuelve y se estabilizan los niveles y se realiza la lectura. La repetición de la secuencia completará el perfil de la playa.

7.1.6 Método_Nivel-Abney

El nivel Abney es un instrumento utilizado en la topografía para determinar desniveles, medir ángulos verticales, pendientes y alturas, por lo cual es óptimo para levantamiento de perfiles de playa. Está compuesto por un tubo de observación fijo, un nivel de burbuja que se encuentra conectado con un brazo utilizado para apuntar y una escala transportadora. Además, posee en la parte interna, un espejo que permite que la persona que está usando el equipo pueda ver la burbuja mientras realiza la medición (*Figura 9*).



Figura 9. Esquema-Método_Nivel-Abney. Modificado de: asequipos.com.

Cuenta con una escala que se divide en grados y se encuentra rotulada a intervalos de 10 grados. Las lecturas a la izquierda del 0 son negativas o cuesta abajo y las lecturas a la derecha del 0 son positivas o cuesta arriba. Para realizar la lectura del ángulo de inclinación, se determina el punto en el cual la flecha intercepta la escala de grados y para para la lectura de los minutos, se utiliza la escala Vernier que se encuentra por encima de la escala de grados. Para ello, se ubica la línea Vernier más cercana y que tenga una intercepción con la escala de grados y se lee el valor. También, se debe tener en cuenta indicar en la planilla si la pendiente es positiva o negativa.

Para su uso, se define un punto de referencia y se determina la dirección del perfil. Luego se mide la distancia vertical desde el ojo del observador hasta el nivel del suelo, la medida se registra en la planilla y se marca en la vara de medición, ya que será la medida que el observador siempre buscará a través de la mira. Posteriormente, el estadalero (persona encargada de ubicar el estadal o regleta métrica en los puntos de interés a lo largo del perfil, garantizando que esté siempre a plomo) ubica la vara de medición en el primer punto de interés, el observador realiza la medición y se anotan los grados y minutos en la planilla, al igual que la distancia entre el punto de referencia y el punto medido, la cual se debe obtener mediante uso de cinta métrica.

7.1.7 Método_Nivel-Óptico

El nivel óptico junto con su trípode, vara/estadal de medición hacen parte de los instrumentos usados para la medición de los cambios de elevación relativa en puntos con distancias conocidas a lo largo de transectos (*Figura 10*). Las lentes del nivel se encuentran fijadas a una altura, por lo que se hace necesario mover el instrumento cuando se presentan elevaciones mayores que la altura del estadal. Este método proporciona solo distancias y diferencias de elevación, basándose en la lectura de elevación que se muestra en la escala del estadal.

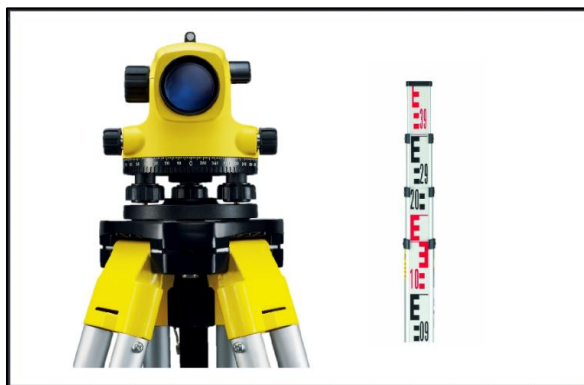


Figura 10. Esquema-Método_Nivel-Óptico. Modificado de: jmequipos.com y soluciontopografia.com.

Para su uso, el trípode junto con el nivel se ubican en el punto de inicio o referencia y con ayuda de los tornillos de nivelación se nivela para garantizar mediciones más precisas y seguras. Se define el rumbo del perfil y el estadalero se ubica en el primer punto, una vez que el estadal esté a plomo, el observador realiza la lectura de los hilos estadimétricos (hilo superior, medio e inferior) y los anota en la tabla de registro. Luego, comunica al estadalero que avance al siguiente punto y vuelve a realizar la lectura y la lleva a la tabla de registro. La repetición de la secuencia completará el perfil de la playa.

Las medidas de los hilos estadimétricos son usadas para calcular la distancia horizontal y la elevación a la que se encuentra el punto medido respecto al punto de referencia, tal como se presenta a continuación (*Figura 11*).

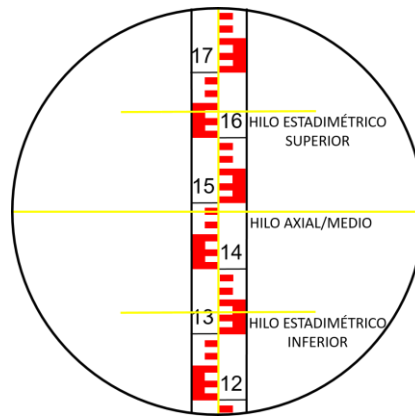


Figura 11. Hilos estadimétricos.

7.1.8 Método_Nivel-Electrónico

El Método_Nivel-Electrónico es una mejora del Método_Nivel-Óptico que consiste en automatizar el proceso de medición (*Figura 12*). Para realizar mediciones con este método se requiere de elementos como un trípode y una vara o estadal especializado que cuenta con una serie de diagrama de barras que reemplazan las gradaciones convencionales, este es interpretado por el instrumento para calcular la distancia horizontal y la elevación.



Figura 12. Esquema-Método_Nivel-Electrónico. Modificado de geotop.bo y civiltec.mx.

Para su uso, el trípode junto con el nivel se ubican en el punto de inicio o referencia y se nivela con ayuda de los tornillos de nivelación. Luego, se realiza la configuración del instrumento para mediciones de topografía y se define el rumbo del perfil. Posteriormente, el estadalero se ubica en el primer punto, una vez que el estadal esté a plomo, el observador visualiza la vara a través de la mira del nivel de manera que la cruz

reticular coincida con el centro del estadal y oprime el botón de disparo para obtener los datos de altura y distancia a la que se encuentra el punto de interés y guarda el dato medido. Comunica al estadalero que avance al siguiente punto y vuelve a realizar la medición. La repetición de la secuencia completará el perfil de la playa y finalmente los datos son extraídos vía digital.

7.1.9 Método_Teodolito-Mecánico

El teodolito es un instrumento de medición mecánico-óptico, utilizado en el campo de la topografía para la medición de ángulos verticales y horizontales. Cuando se involucran otras herramientas auxiliares se pueden medir las distancias y desniveles del terreno. Básicamente, el teodolito es un telescopio montado sobre un trípode, que cuenta con dos círculos graduados que le permiten medir los ángulos verticales y horizontales con ayuda de lentes (*Figura 13*).



Figura 13. Esquema-Método_Teodolito-Mecánico. Modificado de: alibaba.com.

Para su uso, se aplica una metodología similar a la del nivel óptico. Primeramente, se ubica el trípode con el instrumento en el punto de inicio y se nivela con los tornillos niveladores, se define una altura de referencia en la vara, que será la que siempre se buscará a través de la mira para realizar las mediciones. Luego, el estadalero se ubica en el primer punto de interés y una vez que consigue tener el estadal a plomo, el observador busca la altura definida, alineándola con el hilo estadimétrico medio y realiza la lectura de los hilos superior e inferior, al igual que el ángulo vertical que se visualiza en los círculos graduados y los anota en la tabla de registro. Luego, señala al estadalero que avance al siguiente punto y nuevamente realiza la lectura y la lleva a la tabla de registro. La repetición de la secuencia completará el perfil de la playa.

Las medidas de los hilos estadimétricos y ángulo vertical son usadas para calcular la distancia y la elevación a la que se encuentra el punto medido respecto al punto de referencia, basándose en relaciones trigonométricas.

7.1.10 Método_Teodolito-Electrónico

El teodolito electrónico es la versión mejorada del teodolito mecánico y es utilizado para la medición de distancias y ángulos verticales, horizontales o cenitales. Cuenta con una incorporación electrónica para poder realizar las lecturas de los ángulos verticales y horizontales, mostrando el valor en una pantalla digital, eliminando así los errores de apreciación del operario (*Figura 14*).

Para su uso, se ubica el trípode con el instrumento en el punto de inicio y se nivela con los tornillos niveladores, se configura la posición del ángulo vertical, eligiendo 0° o 90° como el cenit y se define una altura que será la que siempre se buscará en el estadal para realizar las mediciones. Luego, el estadalero se ubica en el primer punto de interés y una vez que consigue tener el estadal a plomo, el observador busca la altura definida, alineándola con el hilo estadimétrico medio y realiza la lectura de los hilos superior e inferior y ángulo vertical y los anota en la tabla de registro. Luego, señala al estadalero que avance al siguiente punto y nuevamente realiza la lectura y la lleva a la tabla de registro. La repetición de la secuencia completará el perfil de la playa.

Las medidas de los hilos estadimétricos y ángulo vertical son usadas para calcular la distancia y la elevación a la que se encuentra el punto medido respecto al punto de referencia, basándose en relaciones trigonométricas.



Figura 14. Esquema-Método_Teodolito-Electrónico. Modificado de: civiltec.mx.

7.1.11 Método_Estación-Total

La estación total (ET) es considerada como un instrumento electro-óptico utilizada para la medición de ángulos verticales, horizontales y distancias. Básicamente es un teodolito electrónico mejorado, el cual cuenta con la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador, además de accesorios externos que son necesarios para su operación (*Figura 15*).

Las mediciones realizadas con este instrumento son mediante una onda electromagnética portadora (generalmente microondas o infrarrojos) en diferentes frecuencias que rebotan en un prisma que se ubica en el punto de interés para la medición y regresa al instrumento, el cual toma o calcula el desfase entre las ondas para poder conocer la ubicación del punto. Además, los datos son almacenados en una tarjeta de memoria que se encuentra incorporada al instrumento, los cuales, posteriormente pueden ser extraídos del equipo para su procesamiento.

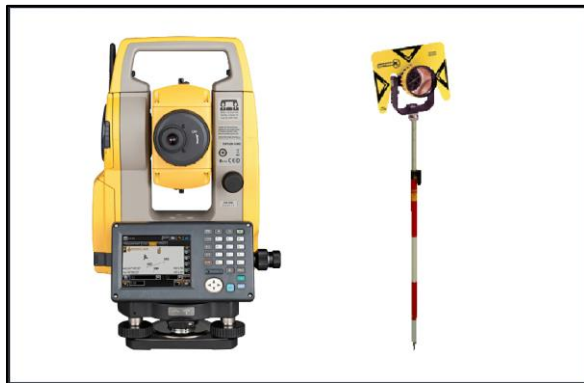


Figura 15. Esquema-Método_Estación-Total. Modificado de: jmequipos.com y dhayi.com.

Para su uso, el trípode junto con la ET se ubican en el punto de inicio y se realiza la configuración de la ET para realizar mediciones de topografía, la cual incluye todas las características del trabajo, nivelación del instrumento, presión, temperatura, altura de la ET y el prisma, punto de referencia/amarre, y se define la dirección del perfil. Luego, el estadalero se ubica en el primer punto de interés y una vez que consigue tener a plomo la vara que sostiene el prisma, el observador busca el centro del prisma a través del ocular de la ET, elige la opción “medir” para que sea enviada la onda electromagnética y en la pantalla aparecerán los datos de medición, seguido a esto, guarda el dato medido. Luego, comunica al estadalero que avance al siguiente punto y nuevamente enfoca el prisma, mide y guarda el dato. La repetición de la secuencia completará el perfil de la playa. Finalmente, se extraen los datos medidos para su posterior procesamiento.

7.1.12 Método_DGPS

El método de sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS, por su sigla en inglés) implica la cooperación de estaciones GPS: fija o Base (Inmóvil, en un punto con coordenadas conocidas) y móvil o Rover (En movimiento, en puntos de coordenadas desconocidas), además de las redes de satélites que son indispensables (*Figura 16*).

El receptor Base, se ubicará en un punto con coordenadas conocidas, preferiblemente sobre un mojón geodésico y se encenderá primero que el Rover para que inicie a registrar una serie de tiempo más larga que servirá de soporte para la corrección diferencial entre los dos receptores; estos como cualquier receptor GPS recibirá las posiciones suministradas por cada uno de los satélites que se encuentren disponibles a lo largo del tiempo, desde que se enciende hasta que se apaga, el receptor base calculará el error de posición suministrado por cada satélite mediante un algoritmo interno que resta la posición obtenida y la posición real de entrada (el mojón geodésico de referencia) en cada Δt , dicha corrección es transmitida en tiempo real al receptor Rover vía UHF, de forma tal que éste al recibirlas pueda corregir las posiciones propias, logrando de esta manera mediciones de precisión centimétrica.



Figura 16. Esquema-Método_DGPS. Modificado de: alibaba.com

Para obtener los perfiles de playa se usa en modo cinemático en tiempo real (RTK por su sigla en inglés), el cual se puede usar de dos técnicas diferentes, (i) *Modo Stop and Go*: Es una técnica utilizada en la que el Rover se ubica de manera progresiva en varios puntos y realizar una parada corta en cada uno de ellos y así poder guardar la posición leída para ese punto en ese momento. (ii) *Modo totalmente cinemático*: Es una técnica en la que se programa el receptor móvil para que registre/guarde las medidas de manera automática cada cierto intervalo de tiempo a lo largo del transecto que se pretenda medir y no hay la necesidad de parar y esperar en cada punto. Después de haber medido el perfil, se extraen los datos para su procesamiento.

7.1.13 Método_RPAS

Los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS, por su sigla en inglés), también conocidas por su nombre común DRONES (*Figura 17*), hacen referencia a una aeronave que vuela sin tripulación. Todo RPAS tiene una serie de componentes, entre esos: la plataforma aérea, los sensores, los mandos y controles, los softwares, métodos de procesamientos y los usuarios o personal encargado de realizar el sobrevuelo.

En el campo de la topografía es indispensable contar con sensores especializados para realizar dicha actividad; sensores RGB (sensor del espectro visible) que son usados para levantamientos fotogramétricos o LIDAR que es un láser que permite tener las elevaciones del terreno. En ocasiones los RPAS pueden ser utilizados en conjunto con una base RTK en tierra, la cual le servirá para realizar correcciones de la posición de la aeronave y por ende tener una mayor precisión en las mediciones.



Figura 17. Esquema-Método_RPAS. Modificado de: jetstereo.com, geocom.cl y findglocal.com.

Para realizar MPP utilizando el RPAS es necesario contar con algunas aplicaciones y softwares para tareas específicas como: (i) revisar el estado de la aeronave (p.e. DJI GO 4®), (ii) realizar la programación del sobrevuelo (p.e. DroneDeploy®), (iii) procesamiento de las fotografías para obtener mosaico y modelo de elevación digital del terreno (DEM) (p.e. PIX4Dmapper®), (iv) ortorectificar el DEM y extraer perfiles (p.e. ArcGis®).

Durante este trabajo se efectuaron sobrevuelos del perfil a diferentes alturas (20, 60 y 90 m), cuyos resultados se discutirán más adelante

7.1.14 Método_Escáner-Laser-Terrestre

El escáner láser terrestre es un instrumento utilizado para la medición de distancias y ángulos mediante un rayo de luz láser, el cual se combina con cámaras fotográficas para registrar también la información del rango visible, lo que lo convierte altamente útil en el campo de la topografía (*Figura 18*). Además, puede recopilar datos puntuales en un rango de ángulo de 360° alrededor del punto donde fue ubicado el instrumento, y la cantidad de datos que pueda recolectar representados en forma de puntos, pueden ser utilizados para crear el modelo tridimensional del lugar observado.

Este escáner está basado en la emisión de una serie de ondas láser con longitudes diferentes, las cuales llegan al objeto que se está midiendo y cuando son reflejadas por

éste, son recibidas nuevamente por el escáner, y comparando la fase de estas ondas (emitidas y recibidas), se calcula la distancia a la que se encuentra el objeto.



Figura 18. Esquema-Método_Escáner-Láser_Terrestre. Modificado de: geospatial.trimble.com.

7.1.15 Método_Ecosonda

La Ecosonda es un instrumento usado para determinar la batimetría (*Figura 19*). Permite medir la distancia vertical en el agua (la profundidad) mediante ondas acústicas, esta medición se obtiene calculando el tiempo transcurrido entre la transmisión y la recepción del eco.

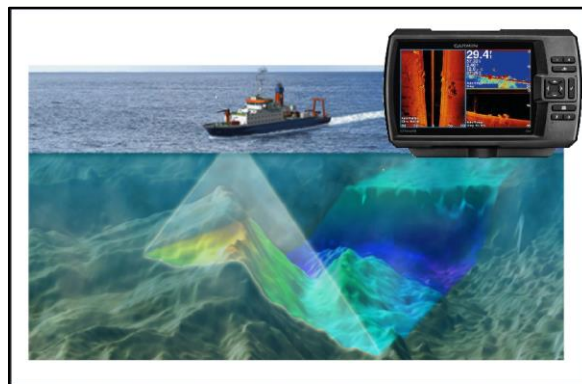


Figura 19. Esquema-Método_Ecosonda. Modificado de: tecnoceano.com y nautica.com.

El sistema de sonda básicamente está conformado por el transductor (encargado de emitir la onda) y el receptor (encargado de recibir la onda). Cuando la onda es recibida, se producen señales eléctricas que forman una imagen en el monitor para poder visualizar la batimetría que se está realizando.

Hay dos tipos de sondas: monohaz y multihaz. La diferencia radica en que la primera solo permite obtener la profundidad en un punto, de forma de que al mover la embarcación utilizándola, se tiene la batimetría de una línea. Mientras que, la sonda multihaz permite obtener la profundidad de una línea (transversal a la trayectoria de la

embarcación), así que cuando la embarcación se desplaza, permite obtener la batimetría de un área.

Este método solo permite hacer mediciones en la parte sumergida, y dependiendo de la embarcación donde se instale, dependerá la profundidad mínima que pueda registrar sin poner en riesgo el equipo, generalmente es un método complementario a los métodos topográficos explicados previamente.

7.2 Comparación de los métodos por playa

La estación total, al igual que el nivel óptico y otros instrumentos electrónicos son considerados métodos con alto grado de precisión en levantamientos topográficos, pues son instrumentos que presentan errores centimétricos. Para realizar las comparaciones del error de cada uno de los métodos utilizados se establecieron seis puntos de control, la distancia horizontal a la que estaban ubicados fue medida tanto con cinta métrica como con cuatro de los métodos que se presentan en la *Tabla 7*, de los cuales el Método_Estación-Total presento un mejor ajuste, $r = 0.9999$ y $RMSE = 0.1239 m$. En base a esto, se decidió escoger el Método_Estación-Total como el más preciso y a partir de las mediciones realizadas con él como referencia, se calcularon los errores de los diferentes métodos.

Tabla 7. Comparación estadística de mediciones longitudinales en puntos de control.

Métodos	r	r ²	RMSE (m)
Método_Estación-Total	0.9999	0.9998	0.1239
Método_DGPS	0.9999	0.9997	0.2353
Método_Nivel-Óptico	0.9998	0.9997	0.2490
Método_Teodolito-Electrónico	0.9996	0.9992	0.3540

(r: coeficiente de correlación de Pearson; r²: coeficiente de determinación y RMSE: error cuadrático medio).

7.2.1 Perfil de control UdeA

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la medición de los perfiles realizados en la UdeA (*Figura 20*). De manera general, se muestra un comportamiento aproximadamente plano al principio y al final del perfil, y en la parte intermedia se presenta una pendiente negativa que corresponde a las escalinatas del perfil (*Figura 21*).

El Método_Delgado&Lloyd al igual que el Método_RPAS a las diferentes alturas (20, 60 y 90 m) muestran una pendiente positiva mientras que los demás métodos evidencian un comportamiento del perfil tendiente a ser plano, por lo que parece ser que estos dos métodos sobreestiman algunos valores en la medición de la elevación.

El Método_DGPS presenta una variación de aproximadamente 0.30 m en la primera parte del perfil respecto a las mediciones realizadas con los otros métodos, la cual puede ser causada debido a la interferencia generada por una estructura (>10m en mampostería) ubicada al principio del perfil. Esta actúa como barrera, impidiendo que el DGPS pueda recibir de manera correcta la señal de algunos satélites.

Por otra parte, respecto al tiempo de medición, se puede notar que el Método_Nivel-Óptico y el Método_Teodolito-Electrónico requirieron aproximadamente el mismo tiempo, esto es principalmente porque la metodología empleada es similar al igual que la cantidad de datos que se registran. En cuanto al Método_RPAS, la comparación del tiempo necesario para medir el perfil respecto a los demás métodos puede no ser muy apropiada, puesto que con este método se tenía que sobrevolar un área importante (> 1 ha) ya que era importante garantizar que dentro de ésta hubiera los puntos de control necesarios para ser utilizados en el procesamiento de los datos. Sin embargo, si se puede comparar el tiempo entre las diferentes alturas de vuelo, ya que la programación de la trayectoria fue la misma, y se puede notar que a medida que se aumenta la altura, disminuye el tiempo de medición y esto está relacionado con el campo de visión, ya que, a mayor altura mayor campo de visión lo cual implica menos fotografías para completar el mismo plan de vuelo.

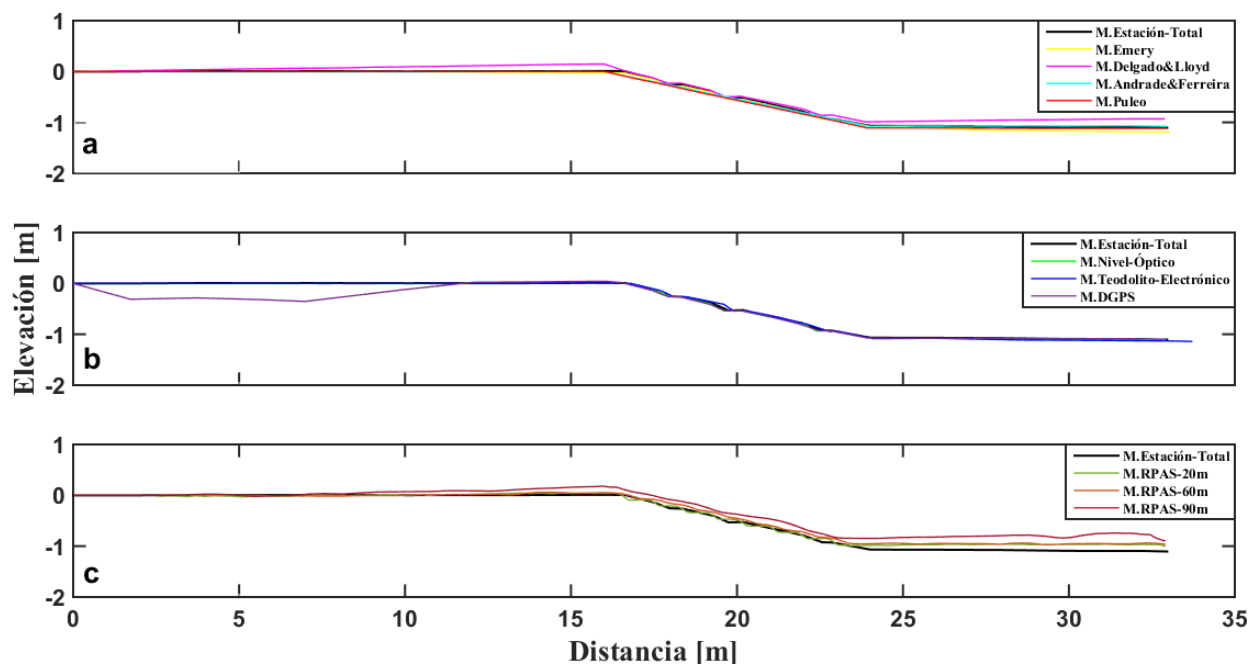


Figura 20. Perfiles medidos en la UdeA. (a: comparación con los métodos manuales; b: comparación con métodos tecnológicos y c: comparación a diferentes alturas con el Método_RPAS).

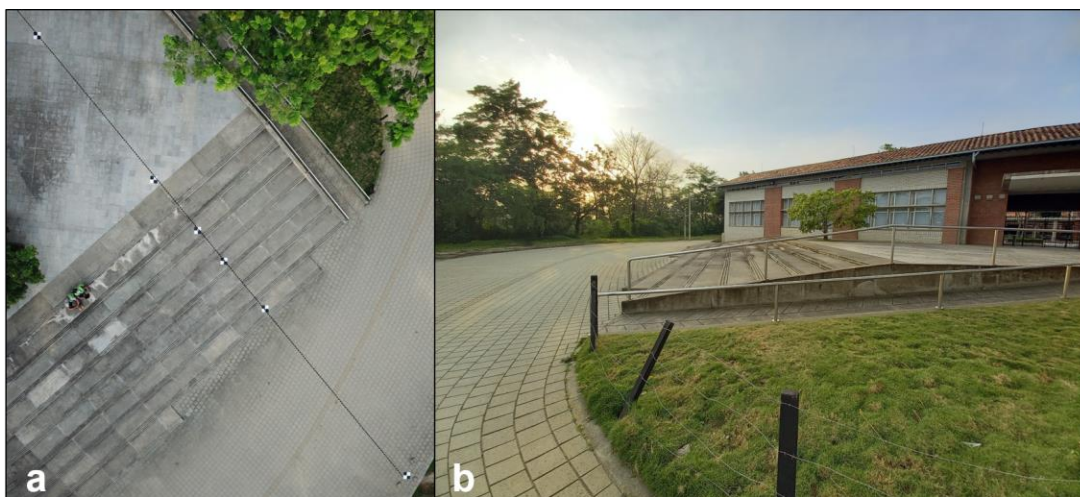


Figura 21. Fotografía del perfil de control UdeA. (a: fotografía aérea de la zona y la línea representa por donde fue medido el perfil y b: muestra una vista en perfil de la zona, evidenciando las partes planas y las escalinatas).

Considerando el tiempo necesario para realizar la MPP con los diferentes métodos (Tabla 8), ya que este parámetro puede repercutir notablemente en la decisión de elegir o no un método, se encontró que el Método_Puleo fue con el que se midió el perfil en el menor tiempo (16 minutos) y el que más tiempo requirió fue el Método_Andrade&Ferreira (57 minutos), esto principalmente porque había que invertir un poco más de tiempo para lograr tener los postes nivelados y esperar que el agua dentro de la manguera se estabilizara para tomar las medidas.

Tabla 8. Duración de cada método - Perfil de control UdeA.

Perfil de Control UdeA			
Métodos	Longitud (m)	Duración (h:mm:ss)	Duración/Longitud (s/m)
Método_Puleo	32.923	0:16:00	29
Método_Emerly	33.020	0:20:00	36
Método_RPAS_90m	32.908	0:22:00	40
Método_DGPS	32.860	0:24:00	44
Método_RPAS_60m	32.908	0:25:00	46
Método_Delgado & Lloyd	32.870	0:28:00	51
Método_Estación_Total	32.961	0:30:00	55
Método_Nivel-Óptico	32.900	0:35:00	64
Método_Teodolito-Electrónico	33.700	0:36:00	64
Método_RPAS_20m	32.908	0:44:00	80
Método_Andrade & Ferreira	32.927	0:57:00	104

De manera visual todos los métodos tienden a describir de manera similar el perfil y, de acuerdo a la situación descrita anteriormente, se realizaron comparaciones de los

diferentes métodos respecto al Método_Estación-Total que fue considerado como el más preciso. Para ello, se filtraron los datos de los diferentes métodos de manera que el valor medido en la horizontal (distancia) correspondiera al valor medido con el Método_Estación-Total o al menos presentara una diferencia menor o igual a diez centímetros ($\Delta L < 0.10 \text{ m}$), ya que en esta distancia la variación en la vertical (elevación) del perfil es mínima.

Una vez realizado el filtrado, se garantizó que a cada valor de la elevación medida con el Método_Estación-Total iba a ser el mismo medido con los otros métodos, por lo cual se calcularon los parámetros estadísticos (r , r^2 , y RMSE) y así poder saber de manera cuantitativa el error que presentaban.

De acuerdo a los resultados, todos los métodos muestran una correlación perfecta dado que $r > 0.96$; el Método_Andrade&Ferreira presenta el menor RMSE con un valor 0.0007 m y el Método_RPAS-90m presenta el mayor RMSE con un valor de 0.1658 m. Además, se puede notar que el error del Método_RPAS tiende a aumentar a medida que se aumenta la altura (*Tabla 9*).

Tabla 9. Parámetros estadísticos – Perfil de control UdeA.

Métodos	r	r ²	RMSE (m)
Método_Andrade&Ferreira	0.9998 (16)	0.9996	0.0007
Método_Nivel-Óptico	1.0000 (22)	0.9999	0.0064
Método_Teodolito-Electrónico	1.0000 (08)	0.9999	0.0079
Método_DGPS	0.9997 (22)	0.9993	0.0136
Método_Puleo	0.9998 (15)	0.9996	0.0236
Método_Emery	0.9990 (27)	0.9981	0.0389
Método_RPAS-20m	0.9970 (26)	0.9939	0.0601
Método_Delgado&Lloyd	0.9925 (20)	0.9850	0.0737
Método_RPAS-60m	0.9981 (26)	0.9963	0.0839
Método_RPAS-90m	0.9909 (26)	0.9818	0.1658

(r : coeficiente de correlación de Pearson; r^2 : coeficiente de determinación y RMSE: error cuadrático medio). El valor dentro de paréntesis indica el número de puntos analizados después del filtrado.

7.2.2 Playa Dulce

Los resultados obtenidos de los perfiles medidos en playa Dulce (*Figura 22*), muestran un escalón al principio del perfil y esto se debe a que el punto de inicio fue ubicado sobre una de las estructuras presentes en la playa (*Figura 23*). Al igual que en el Perfil de control en la UdeA, el Método_DGPS vuelve a presentar variaciones notorias al principio del perfil, lo cual se debe a la cercanía con un container el cual actúa como barrera

limitando la comunicación del instrumento con los satélites. Por otro lado, el Método_Andrade&Ferreira presentó grandes variaciones al final del perfil, las cuales pueden ser debidas al viento, ya que finalizando la medición con dicho método éste aumento considerablemente, generando así mayor dificultad para que el nivel del agua dentro de la manguera se estabilizara y, por ende, fue más difícil realizar la lectura.

Aproximadamente a los 25 m se puede evidenciar un canal y seguido a este una pequeña berma, mostrando así, que con todos los métodos utilizados en el presente estudio se pueden determinar geformas presentes a lo largo del perfil. Los perfiles medidos utilizando el Método_RPAS en las diferentes alturas, solo alcanzan una longitud aproximada de 43.8 m debido a que las mediciones con este método están limitadas a la parte emergida.

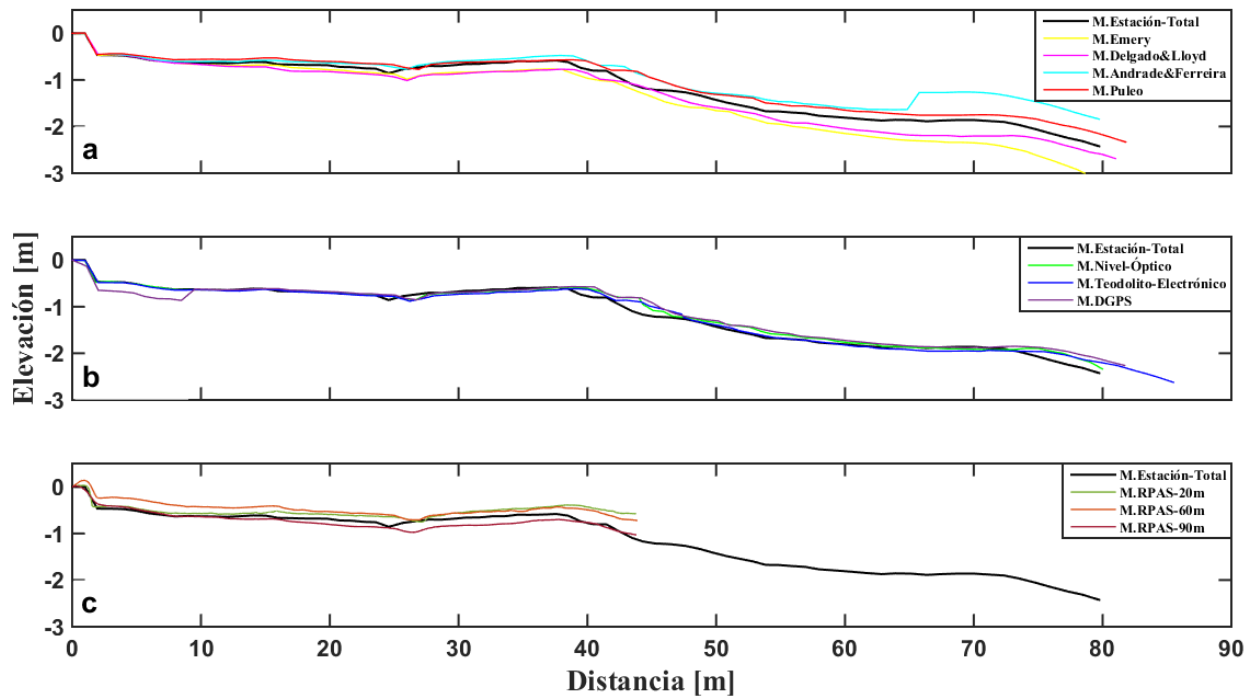


Figura 22. Perfiles medidos en playa Dulce. (a: comparación con los métodos manuales; b: comparación con métodos tecnológicos y c: comparación a diferentes alturas con el Método_RPAS)

Al evaluar el tiempo requerido para completar el perfil con cada método (*Tabla 10*), se dividió la duración entre la longitud del perfil, para que la comparación fuera equitativa, ya que con cada método no se pudo medir la misma distancia horizontal. De acuerdo a los resultados, el Método_Emery fue el que menos tiempo requirió con una longitud de 79 m y una duración de 26 minutos, con una relación de tiempo por metro de longitud de 20 segundos; mientras que el Método_DGPS fue el que más tiempo requirió (1 hora con 44 minutos) y se midió una distancia de 81.730 m, esto es debido principalmente a que

no se tenían las coordenadas del punto donde se ubicó la Base ni las de un punto cercano y, para obtenerlas se tuvo que dejar midiendo el equipo durante una hora y al conocer las coordenadas si se pudo realizar la medición del perfil.

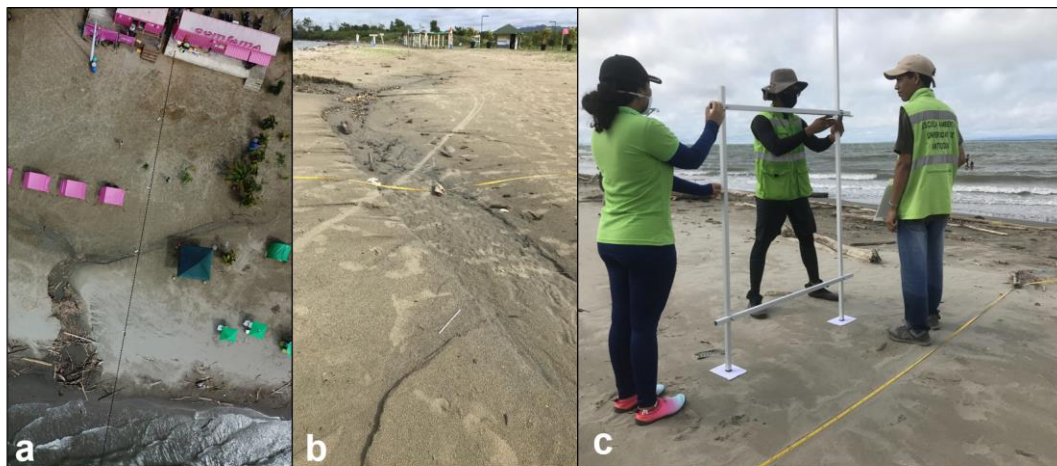


Figura 23. Fotografía del perfil en playa Dulce. (a: fotografía aérea de la zona y la línea representa por donde fue medido el perfil; b: canal presente en una parte del perfil y c: operarios realizando mediciones con el Método_Puleo).

En cuanto a las mediciones realizadas con el Método_RPAS en las diferentes alturas se encontró que, a mayor altura, menor duración y esto se debe a las mismas razones descritas en el perfil de control y en cuanto al valor de la duración son aproximadamente igual que el perfil de control debido a que el área del sobrevuelo fue casi igual.

Tabla 10. Duración de cada método - Perfil de playa Dulce.

Playa Dulce			
Métodos	Longitud (m)	Duración (h:mm:ss)	Duración/Longitud (s/m)
Método_Emery	79.000	0:26:00	20
Método_Delgado&Lloyd	81.000	0:30:00	22
Método_RPAS_90m	43.814	0:22:00	30
Método_RPAS_60m	43.890	0:24:00	33
Método_Puleo	81.811	0:47:00	34
Método_Estación_Total	79.743	0:45:00	34
Método_Andrade&Ferreira	79.749	1:00:00	45
Método_Nivel-Óptico	80.000	1:01:00	46
Método_Teodolito-Electrónico	85.500	1:19:00	55
Método_RPAS_20m	43.778	0:43:00	59
Método_DGPS	81.730	1:44:00	76

De manera visual todos los métodos tienden a describir de manera similar el perfil y, al realizar las comparaciones respecto al Método_Estación-Total se encontró que todos los métodos muestran una correlación perfecta, a excepción del Método_RPAS a 60 y 90 m que presentan una correlación fuerte y a 20 m una correlación significativa. El Método_Andrade&Ferreira presenta el menor RMSE con un valor de 0.0007 m y el Método_Nivel-Óptico presenta el mayor RMSE con un valor de 1.0307 m, (Tabla 11).

Tabla 11. Parámetros estadísticos – Playa Dulce.

Métodos	r	r²	RMSE (m)
Método_Andrade&Ferreira	0.9852 (26)	0.9706	0.0007
Método_Teodolito-Electrónico	0.9990 (18)	0.9980	0.0277
Método_RPAS_90m	0.9293 (46)	0.8635	0.1077
Método_DGPS	0.9868 (23)	0.9737	0.1316
Método_Delgado&Lloyd	0.9964 (25)	0.9929	0.1331
Método_Puleo	0.9988 (25)	0.9976	0.1332
Método_RPAS_20m	0.8102 (46)	0.6565	0.1618
Método_RPAS_60m	0.9125 (46)	0.8327	0.1918
Método_Emery	0.9969 (25)	0.9937	0.2082
Método_Nivel-Óptico	0.9924 (15)	0.9848	1.0307

(r: coeficiente de correlación de Pearson; r²: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio). El valor dentro de paréntesis indica el número de puntos analizados después del filtrado.

7.2.3 Playa Plan Parejo

De acuerdo a los resultados obtenidos de los perfiles medidos en la playa Plan Parejo (Figura 24), se puede observar que la playa presenta una pendiente abrupta comparada con lo observado en playa Dulce, lo cual es debido principalmente al tipo de sedimento presente en la playa (gravas y cantos rodados), esto se muestra en la Figura 25. Todos los métodos tienden a describir de manera correcta el perfil de la playa a excepción del Método_RPAS a 30 y 60 m de altura, esto puede estar ligado a condiciones específicas de la zona. Resulta que, a menor altura en el sobrevuelo se tiene mayor resolución en el producto final, pero debido a la gran cantidad de árboles presentes en el área, impedían que la aeronave pudiera visualizar un mismo punto desde diferentes posiciones a medida que se completaba el plan de vuelo, reduciendo así la cantidad de mediciones de un mismo punto y, por ende, su precisión.

La mayor longitud que se logró medir fue de 19.3 m, pequeña comparada con la medida en playa Dulce (85.5 m), pero dadas las condiciones de la zona, donde se contaba con una playa de gravas y cantos rodados, reflejante y con oleaje fuerte, se dificultó avanzar mucho más allá de la zona de rompiente, principalmente por la fuerte dinámica que se

presenta allí y porque rápidamente se encontraba una profundidad que impedía continuar.

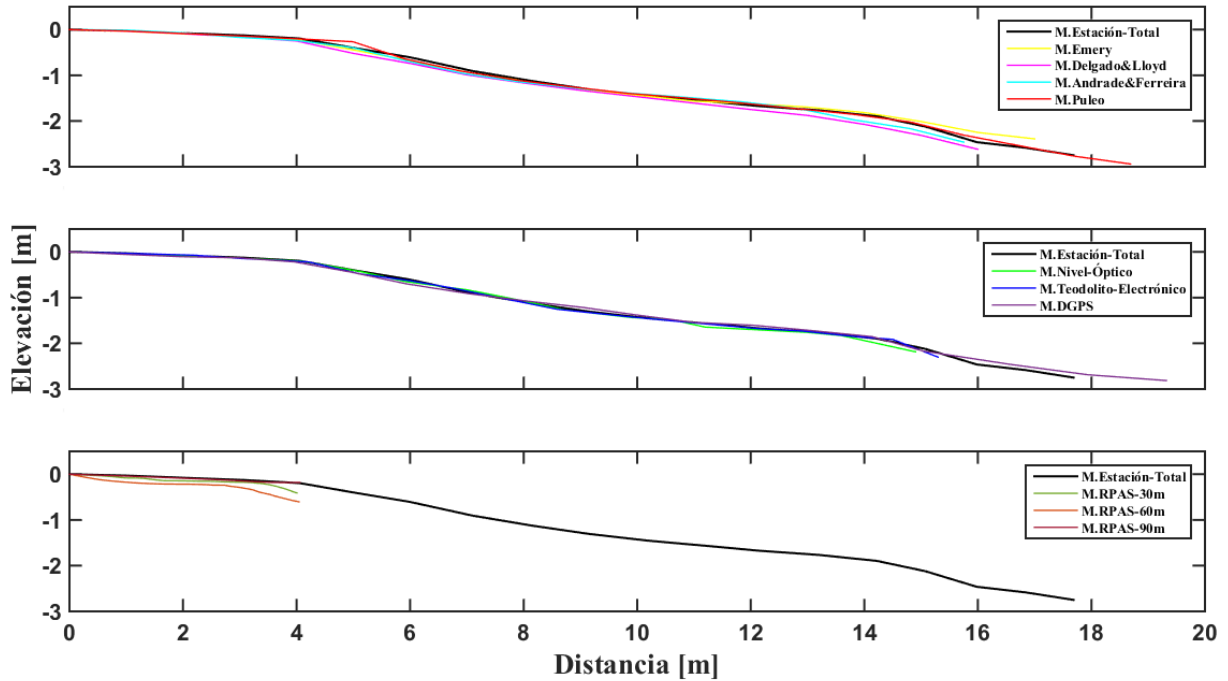


Figura 24. Perfiles medidos en playa Plan Parejo. (a: comparación con los métodos manuales; b: comparación con métodos tecnológicos y c: comparación a diferentes alturas con el Método_RPAS)

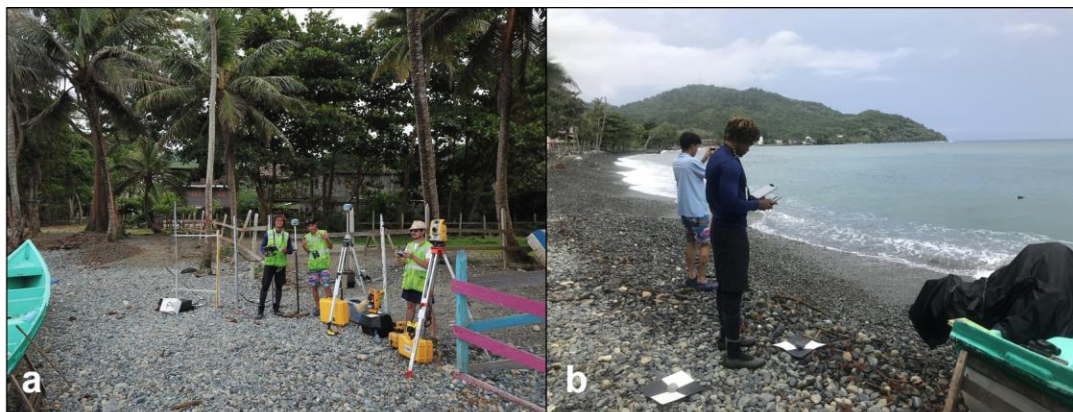


Figura 25. Fotografía del perfil en la playa Plan Parejo. (a: fotografía de todos los métodos utilizados; b: muestra una vista en perfil de la zona, donde se evidencia el tamaño de los sedimentos, la pendiente abrupta y el oleaje rompiendo.

Al evaluar el tiempo empleado para completar el perfil con cada método (*Tabla 12*), al igual que la medición en playa Dulce, se dividió la duración entre la longitud del perfil, para realizar una comparación equitativa, ya que con cada método no se pudo medir la

misma distancia horizontal. De acuerdo a los resultados, el Método_Delgado&Lloyd fue el que menos tiempo requirió con una duración de 5 minutos para medir una longitud de 16 m, lo que significa una razón de 19 s/m; mientras que el Método_DGPS fue el que más tiempo requirió (1 hora con 19 minutos) y se midió una distancia de 19.3 m, esto ocurrió porque al igual que en playa Dulce, no se tenían las coordenadas del punto donde se ubicó la Base ni las de un punto cercano y para obtenerlas se debió medir la posición de la base por una hora e ingresar esa medición promediada como posición fija de referencia.

Al igual que en el Perfil de control y en playa Dulce, se tenía la intención de realizar los sobrevuelos a 20, 60 y 90 m de altura para conocer como influía la altura en la precisión del producto final, pero en esta playa se tuvo que realizar a una altura mínima de 30 m porque el tamaño de los árboles en el área de estudio, impedía que se sobrevolara a una altura menor.

Tabla 12. Duración de cada método - Perfil de playa Plan Parejo.

Playa Plan Parejo			
Métodos	Longitud (m)	Duración (h:mm:ss)	Duración/Longitud (s/m)
Método_Delgado&Lloyd	16.000	0:05:00	19
Método_Emery	17.000	0:06:00	21
Método_Puleo	18.690	0:09:00	29
Método_Andrade&Ferreira	15.751	0:16:00	61
Método_Nivel-Óptico	14.900	0:25:00	101
Método_Teodolito-Electrónico	15.300	0:26:00	102
Método_Estación-Total	17.686	0:34:00	115
Método_DGPS	19.320	1:19:00	245
Método_RPAS_90m	4.058	0:28:00	414
Método_RPAS_60m	4.043	0:42:00	623
Método_RPAS_30m	4.008	0:54:00	808

De acuerdo a los resultados de los parámetros estadísticos, todos los métodos muestran una correlación perfecta dado que $r > 0.96$; el Método_Andrade&Ferreira presenta el menor RMSE con un valor de 0.0059 m y el Método_RPAS-60m presenta el mayor RMSE con un valor de 0.2176 m, (Tabla 13).

Tabla 13. Parámetros estadísticos – Playa Plan Parejo.

Métodos	r	r²	RMSE (m)
Método_Andrade & Ferreira	0.9923 (07)	0.9846	0.0059
Método_RPAS_90m	0.9797 (05)	0.9599	0.0151
Método_Teodolito-Electrónico	0.9991 (06)	0.9982	0.0310
Método_Nivel-Óptico	0.9974 (09)	0.9949	0.0381
Método_DGPS	0.9987 (11)	0.9974	0.0428
Método_Puleo	0.9982 (08)	0.9964	0.0534
Método_Emery	0.9986 (10)	0.9971	0.0812
Método_Delgado & Lloyd	0.9993 (10)	0.9986	0.1019
Método_RPAS_30m	0.9649 (05)	0.9310	0.1057
Método_RPAS_60m	0.9634 (05)	0.9282	0.2176

(r: coeficiente de correlación de Pearson; r²: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio). El valor dentro de paréntesis indica el número de puntos analizados después del filtrado.

7.3 Evaluación de la eficiencia operativa de acuerdo al tipo playa (reflejante y disipativa)

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede notar que al realizar mediciones en playas reflejantes y, en este caso, con sedimentos de gravas y cantos rodados (p.e. playa Plan Parejo), el tiempo necesario para medir un metro lineal del perfil es mayor que al realizar mediciones en playas disipativas con sedimentos de tamaño arena (p.e. playa Dulce). Esta diferencia es debida, principalmente, a que en la playa reflejante se presenta un mayor oleaje, la rompiente tiende a ser en voluta (mayor liberación de energía al romper) y el lecho es más inestable debido a la falta de cohesión de las partículas (cantos rodados).

En el caso de los métodos que requieren de un estadal para sus mediciones, cuando el oleaje pasa, los sedimentos superficiales son removidos y se genera un pequeño movimiento y/o hundimiento en el lugar donde éste fue puesto, lo cual puede alterar los resultados. Para disminuir el error y la dificultad en la medición, había que esperar que pasara un tren de olas hasta que llegasen unas con menor altura que permitieran realizarla. Contrariamente sucede en la playa disipativa que, al presentar oleaje más suave (tipo descrestamiento), permite que se realicen las mediciones sin mayor dificultad y de manera más rápida.

Los resultados dan evidencia que en el caso de los métodos manuales no se presentó mayor variación en el tiempo necesario para medir un metro lineal del perfil, mientras que en los métodos tecnológicos si hay una diferencia significativa, aproximadamente una relación de 2:1 y 3:1 (*Tabla 14*).

Tabla 14. Comparación en duración de la medición de cada método de acuerdo al tipo de playa.

Métodos	Duración/Longitud (s/m)	
	Playa Dulce	Playa Plan Parejo
Método_Delgado & Lloyd	22	19
Método_Emery	20	21
Método_Puleo	34	29
Método_Andrade & Ferreira	45	61
Método_Nivel-Óptico	46	101
Método_Teodolito-Electrónico	55	102
Método_Estación_Total	34	115
Método_DGPS	76	245
Método_RPAS_90m	30	414
Método_RPAS_60m	33	623

7.4 Evaluación económica de los métodos

El costo de los equipos y materiales que se requieren para realizar las mediciones con cada método se incluyó en la evaluación económica (*Tabla 15*). El Método_Ecosonda fue el más costoso con un costo total aproximado de COP \$126´000.000, aunque el costo que se incluyó para la embarcación, sólo se consideró por cada día que se realice la medición. En el otro extremo, el Método_Emery fue el más económico con un valor aproximado de COP \$30.000. De forma general, todos los métodos manuales presentaron una diferencia significativa comparado con los métodos tecnológicos.

Tabla 15. Comparación de costos entre los diferentes métodos.

Método	Costo del instrumento (COP)	Costo de materiales (COP)		Costo total (COP)
		Ítem	Costo	
Método_Emery	\$ 30,000	-	-	\$ 30,000
Método_Delgado&Lloyd	\$ 70,000	-	-	\$ 70,000
Método_Andrade&Ferreira	\$ 110,000	-	-	\$ 110,000
Método_Puleo	\$ 80,000	-	-	\$ 80,000
Método_Chowdhury	\$ 115,000	-	-	\$ 115,000
Método_Nivel-Abney	\$ 350,000	Estadia	\$ 250,000	\$ 600,000
Método_Nivel-Óptico	\$ 1,500,000	Trípode	\$ 300,000	\$ 2,050,000
		Estadia	\$ 250,000	
Método_Nivel-Electrónico	\$ 8,000,000	Trípode	\$ 300,000	\$ 8,550,000
		Estadia	\$ 250,000	
Método_Teodolito-Mecánico	\$ 1,500,000	Trípode	\$ 300,000	\$ 2,050,000
		Estadia	\$ 250,000	
Método_Teodolito-Electrónico	\$ 3,400,000	Trípode	\$ 300,000	\$ 3,950,000
		Estadia	\$ 250,000	
Método_Estación-Total	\$ 15,000,000	Trípode	\$ 300,000	\$ 15,750,000
		Prisma	\$ 250,000	
		Jalón	\$ 200,000	
Método_DGPS	\$ 60,000,000	Trípode	\$ 300,000	\$ 60,500,000
		Jalón	\$ 200,000	
Método_RPAS	\$ 5,000,000	-	-	\$ 5,000,000
Método_Ecosonda	\$120,000,000	Monitor	\$ 5,000,000	\$ 126,000,000
		Embarcación	\$ 1,000,000	
Método_Escáner-Láser-Terrestre	\$120,000,000	Trípode	\$ 300,000	\$ 120,300,000

Nota: valores tomados de cotizaciones realizadas a empresas dedicadas a la venta de equipos topográficos con precio del año 2020, IVA incluido.

Así mismo se realizó la comparación respecto a los costos diarios de personal que se requiere para la MPP con cada método (*Tabla 16*), teniendo en cuenta el nivel educativo que exige cada uno, desde bachiller hasta profesional y basados en la escala mínimos de remuneración para el año 2020. Claramente, se puede notar que los costos asociados a los métodos manuales siguen siendo menores que los tecnológicos, debido principalmente al nivel educativo requerido para utilizar dichos métodos.

Tabla 16. Comparación de costos asociada al personal requerido para la MMPP con cada método.

Método	Nivel educativo	Personal requerido	Costo por persona (COP/día)	Costo total (COP)
Método_Emery	Bachiller	3	\$ 30,000	\$ 90,000
Método_Delgado&Lloyd	Bachiller	3	\$ 30,000	\$ 90,000
Método_Andrade&Ferreira	Bachiller	3	\$ 30,000	\$ 90,000
Método_Puleo	Bachiller	3	\$ 30,000	\$ 90,000
Método_Chowdhury	Bachiller	3	\$ 30,000	\$ 90,000
Método_Nivel-Abney	Bachiller	3	\$ 30,000	\$ 90,000
Método_Nivel-Óptico	Técnico/ Tecnólogo	1	\$ 65,000	\$ 125,000
	Bachiller	2	\$ 30,000	
Método_Nivel-Electrónico	Técnico/ Tecnólogo	1	\$ 65,000	\$ 125,000
	Bachiller	2	\$ 30,000	
Método_Teodolito-Mecánico	Técnico/ Tecnólogo	1	\$ 65,000	\$ 125,000
	Bachiller	2	\$ 30,000	
Método_Teodolito-Electrónico	Técnico/ Tecnólogo	1	\$ 65,000	\$ 125,000
	Bachiller	2	\$ 30,000	
Método_Estación-Total	Técnico/ Tecnólogo	1	\$ 65,000	\$ 95,000
	Bachiller	1	\$ 30,000	
Método_DGPS	Profesional	1	\$ 70,000	\$ 70,000
Método_RPAS	Profesional	1	\$ 75,000	\$ 75,000
Método_Escáner-Láser-Terrestre	Profesional	1	\$ 90,000	\$ 90,000
Método_Ecosonda	Profesional	1	\$ 90,000	\$ 90,000

Nota: valores tomados de escala mínimos de remuneración a precio del año 2020.

7.5 Evaluación PAJ de los métodos

Una vez realizadas las mediciones en los tres sitios escogidos y basado en la revisión bibliográfica, se realizó una comparación entre todos los métodos identificados mencionados en la sección 6.1, aplicando la comparación de proceso analítico jerárquico. Los principales criterios de la comparación fueron los mencionados en la metodología: factores técnicos (FT), factores operativos (FO) y factores económicos (FE).

Se realizaron comparaciones bajo cuatro (4) escenarios posibles: cuando los tres criterios tenían igual importancia (FT=FO=FE) y tres (3) escenarios restantes cuando uno de los criterios tenía importancia extrema y los otros dos permanecían con igual importancia entre sí (*Tabla 17*). Los resultados obtenidos sugieren que, al mantener los tres criterios con el mismo grado de importancia, el Método_Puleo obtiene una mayor priorización, al igual que cuando los FT y FO tienen importancia extrema. Cuando el criterio que presenta mayor importancia es el FE, el Método_Emery es la mejor opción.

Tabla 17. Resultados de la comparación mediante el proceso analítico jerárquico.

Alternativas	Importancia de los criterios de evaluación			
	FT=FO=FE	FT>(FO=FE)	FO>(FT=FE)	FE>(FT=FO)
Método_Puleo	0.177 (01)	0.202 (01)	0.184 (01)	0.144 (02)
Método_Emery	0.155 (02)	0.155 (02)	0.136 (02)	0.174 (01)
Método_Chowdhury	0.088 (03)	0.103 (03)	0.068 (06)	0.095 (05)
Método_Delgado&Lloyd	0.086 (04)	0.076 (05)	0.052 (08)	0.129 (03)
Método_Andrade&Ferreira	0.085 (05)	0.102 (04)	0.052 (09)	0.101 (04)
Método_Estación-Total	0.065 (06)	0.052 (07)	0.111 (03)	0.030 (12)
Método_Nivel-Abney	0.064 (07)	0.070 (06)	0.046 (10)	0.074 (06)
Método_Nivel-Eléctrico	0.061 (08)	0.038 (09)	0.110 (04)	0.036 (10)
Método_DGPS	0.043 (09)	0.033 (10)	0.076 (05)	0.021 (13)
Método_RPAS	0.037 (10)	0.024 (14)	0.054 (07)	0.034 (11)
Método_Nivel-Óptico	0.034 (11)	0.030 (11)	0.023 (12)	0.049 (07)
Método_Escáner-Láser-Terrestre	0.032 (12)	0.043 (08)	0.037 (11)	0.015 (14)
Método_Teodolito-Eléctrico	0.030 (13)	0.029 (13)	0.022 (13)	0.040 (09)
Método_Teodolito-Mecánico	0.031 (14)	0.030 (12)	0.016 (14)	0.048 (08)
Método_Ecosonda	0.012 (15)	0.013 (15)	0.013 (15)	0.009 (15)

FT: Factores Técnicos, FO: Factores Operativos y FE: Factores Económicos. El valor dentro de paréntesis indica el orden de priorización.

Si se tienen en cuenta los cinco primeros métodos priorizados cuando los tres criterios tienen igual importancia y cuando los FT y FE presentan importancia extrema sobre los demás, son los métodos manuales los que presentan mayor priorización sobre los tecnológicos. Mientras que al presentar mayor importancia los FO siguen dominando los métodos manuales, pero ya aparecen algunos de los tecnológicos como el Método_Estación-Total y el Método_DGPS.

Los resultados aquí presentados pueden variar dependiendo la persona que realice la evaluación. Aunque en la metodología de comparación a través del PAJ se asignan valores numéricos en cada evaluación y se aplican una serie de procesos matemáticos para disminuir la subjetividad durante la comparación, aún ésta sigue implícita, pues todo

dependerá de la experiencia del evaluador con cada método. Los valores asignados en las matrices de comparación y la verificación de las propiedades se muestran en los anexos A, B y C.

8. CONCLUSIONES

A partir de la aplicación de la metodología y del análisis de los resultados obtenidos se pueden extraer varias conclusiones:

De la revisión bibliográfica se encontró un número importante de métodos (15), los cuales fueron clasificados para mejorar la facilidad de interpretación; lo cual indica que hay una amplia oferta de MMPP. Sin embargo, al revisar los métodos, muchos de ellos son bastantes similares, lo que indica que aún se pueden desarrollar nuevos prototipos para determinar los perfiles de playa. En síntesis, la MPP es un campo científico bien reconocido, pero no por ello, agotado.

En relación con los resultados de la revisión documental y a partir de la medición realizada, se determinó que el Método_Estación-Total es el más preciso. A partir de su comparación con los diferentes métodos, se concluye que todos describen de manera muy aproximada el perfil, con una correlación por encima de 0.96, a excepción del Método_RPAS que sobrestima algunos valores de la elevación, presentándose así una correlación menor, esto puede deberse principalmente a la precisión de los sensores equipados en la aeronave y a la inestabilidad que esta puede presentar en el aire por efecto del viento.

La comparación de los diferentes MMPP entre los dos tipos de playas estudiadas mostró que el tiempo necesario para realizar la medición de un metro lineal del perfil es menor en playas disipativas que en playas reflejantes, en playas de arena que en playas de cantos rodados, y en playas resguardadas del oleaje que en aquellas mayormente expuestas, sobre todo con los métodos tecnológicos, donde se encontró una variación en tiempo de aproximadamente el doble y triple, esto debido a que los factores de la altura de ola, el tamaño de sedimento (entre cantos, arenas o limos y arcillas) y la pendiente juegan un papel importante en la estabilidad de los operarios y equipos al momento de tomar datos en la zona sumergida. Por otro lado, cabe la pena resaltar que en playas disipativas se logra medir una mayor distancia, gracias a que el perfil es de poca pendiente.

Cuando los métodos manuales son usados de manera correcta, se obtienen resultados muy similares a los del Método_Estación-Total (considerado el método más preciso), incluso igual o mejor que la de los otros métodos tecnológicos considerados en el

presente estudio. Además, presentan una gran diferencia en cuanto al costo, lo cual los convierte en una opción mucho más viable para la MPP. Como consecuencia de lo expuesto, implementar métodos manuales en el contexto colombiano es una gran alternativa que permite ampliar las redes de monitoreo de manera espacio-temporal, vinculando a la comunidad que puede ser considerada como una alternativa de ciencia ciudadana y apropiación local del conocimiento. Además, el contar con registros más amplios, continuos y con buen nivel de precisión, permitirá conocer de manera más detallada la dinámica de una determinada zona y así tomar decisiones más acertadas frente al fenómeno que se esté presentando. Ahora bien, para temas de diseño de obras o intervenciones más rigurosas se recomienda hacer uso de equipos tecnológicos como el DGPS, la ecosonda y la estación total, de tal manera que los datos cuenten con un respaldo de marca respecto a cualquier error que pudiera haber por la fabricación del equipo, aspecto que no se cuenta con el uso de equipos manuales o de fácil fabricación.

Con respecto a la evaluación económica, hablando de precios en moneda colombiana (COP) y a la fecha de 2020, en el mercado hay una gran variedad de costos asociados a cada uno de los métodos (aproximadamente entre 30.000 y 126'000.000 COP), siendo los métodos manuales los más económicos comparado con los tecnológicos. Los dos métodos más económicos fueron el Método_Emery (~30.000 COP) y el Método_Delgado&Lloyd (~70.000 COP), mientras que los de mayor costo fueron el Método_Escáner-Laser-Terrestre (~120.300.000 COP) y el Método_Ecosonda (~126.000.000 COP). La principal diferencia de costos es debida a que estos últimos, en base al principio físico utilizado, requieren de la incorporación de sensores más sofisticados y softwares específicos para el control del equipo durante la medición topográfica. Ahora bien, el uso de estos equipos tecnológicos de alto costo es mucho más amplio, y no solo sirven para sacar perfiles topobatimétricos, sino también para mediciones de otras geoformas en el litoral costero, como dunas, acantilados, infraestructura en la parte emergida por parte del escáner laser y barras sumergidas, cañones submarinos, arrecifes o infraestructura de protección costera sumergida por parte de la ecosonda. En este sentido se recomienda la adquisición de estos equipos si el propósito de su uso va a ser mucho más amplio que solo las mediciones de perfiles topobatimétricos

Por otro lado, en cuanto a la aplicación del método PAJ para la comparación de las diferentes alternativas (métodos), en relación a los tres criterios de evaluación (FT, FO y FE), cuando tienen igual importancia, al igual que cuando los FT o los FO presentan importancia extrema sobre los demás, el Método_Puleo resulta ser el más priorizado. En cuanto al FE, los métodos manuales presentan una marcada diferencia sobre los tecnológicos, y el Método_Emery resulta ser el más económico. A pesar que los métodos tecnológicos presentaron una baja priorización comparado con los manuales, no se

desmeritan que estos sean muy efectivos para la MPP. En el presente estudio se analizó un perfil único, pero para levantamientos que requieren varios perfiles, se intuye que los métodos tecnológicos podrían ser más eficientes por la automatización durante el proceso de medición y procesamiento de los datos.

Según la descripción de los autores de algunos métodos manuales, describen que pueden ser utilizados por una o dos personas para realizar las mediciones. Sin embargo, si estas se llevan a cabo con tres personas, el trabajo es mucho más efectivo, ya que dos miden con los instrumentos, mientras que la otra persona registra los datos en la planilla. Esto también aplica para algunos métodos tecnológicos en los que es necesario registrar las mediciones en las planillas como: el Método_Teodolito-Mecánico, Método_Teodolito-Electrónico, Método_Nivel-Óptico y el Método_Nivel-Abney.

La principal desventaja de los métodos manuales es que las medidas posteriores dependen de la inmediatamente anterior, presentándose así un error acumulativo, por lo cual, el tomar datos erróneos puede alterar todas las mediciones. Con los métodos tecnológicos no se presenta este error debido a que el cálculo de la elevación y la distancia de un punto cualquiera es independiente de los puntos anteriores y se calcula respecto al punto base o de referencia.

El Método_RPAS es más eficiente para realizar levantamientos grandes, ya que se necesita que dentro del área de sobrevuelo puedan ser incluidos una cantidad suficiente de puntos de control, necesarios para mejorar el procesamiento de la ortofoto y, por ende, para obtener resultados con un mayor grado de precisión. La eficiencia radica en que del área sobrevolada se pueden extraer más de un solo perfil y la densidad de puntos medidos es mayor comparado con los otros métodos, en el caso de la medición en el perfil de control UdeA con el Método_Estación-Total se midieron 26 puntos a lo largo del perfil, mientras que con el Método_RPAS-20m se midieron 863.

9. RECOMENDACIONES

- En trabajos futuros se recomienda realizar mediciones con todos los métodos, ya que en este trabajo solo se validaron en campo 9 de los 15 métodos identificados.
- Realizar mediciones que involucren varios perfiles para determinar si los métodos manuales siguen predominando sobre los tecnológicos o si estos últimos tienen mayor relevancia por la automatización. Al igual, incluir el tiempo de procesamiento de los datos con cada método en posteriores análisis.

- Aplicar el método PAJ al menos por tres profesionales ya que los resultados pueden variar en relación a la visión de cada evaluador.
- Para programas de monitoreo de perfiles de playa que no cuenten con la capacidad económica necesaria para realizar mediciones con métodos tecnológicos, se recomienda implementar métodos manuales, ya que se demostró que además de presentar un bajo costo frente a los tecnológicos, permiten obtener resultados muy confiables. De igual forma, por ser de bajo costo, se pueden implementar mediciones con mayor resolución espacial y temporal, que permitan tener amplia información del comportamiento de una determinada playa a lo largo de las diferentes épocas climáticas.
- Se recomienda que de forma complementaria al monitoreo de los perfiles de playa se calcule la profundidad de cierre correspondiente a la altura de ola significativa y al tipo de sedimentos del lugar y así saber los resultados de las mediciones topobatómetricas de la playa a que porcentaje del perfil completo corresponden.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara-Carrió, J., Caicedo, A., Hernández, J. C., Jaramillo-Vélez, A., & Manzolli, R. P. (2019). Sediment bypassing from the new human-induced lobe to the ancient lobe of the Turbo Delta (Gulf of Urabá, Southern Caribbean Sea). *Journal of Coastal Research*, 35(1), 196-209.
- Andrade, C. A., & Pinzón, V. M. (2011). Efectos de la sobre-elevación del nivel del mar por el cambio climático en las playas de los cayos del Archipiélago de San Andrés. *Boletín científico CIOH*, 71(29), 60–71.
<https://doi.org/10.26640/22159045.229>
- Andrade, F., & Ferreira, M. A. (2006). A Simple Method of Measuring Beach Profiles. *Journal of Coastal Research*, 224, 995–999. <https://doi.org/10.2112/04-0387.1>
- Bernabéu, A., Medina, R., Vidal, C., & Muñoz-Pérez, J. J. (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos.
- Calkins, H. A., & Yule, J. G. B. (1927). *The Abney Level Handbook*.
<https://books.google.co.id/books?id=w98sAQAAMAAJ>
- CEPAL, NU. (2012). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: Efectos teóricos. Chile: Naciones Unidas.

- Chowdhury, S. R., Hossain, M. S., & Sharifuzzaman, S. M. (2014). A simple and inexpensive method for muddy shore profiling. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 32(6), 1383–1391. <https://doi.org/10.1007/s00343-015-4002-4>
- de la Peña Olivas, J. M., Rojas, V. S., & Saiz, J. A. (2004). Concepto de la profundidad de cierre. Aplicación a la costa del Maresme. *Revista Digital del Cedex*, (134), 37-37.
- Decreto 1120 de 2013 [con fuerza de ley]. Por medio del cual se reglamentan las Unidades Ambientales Costeras -UAC- y las comisiones conjuntas, se establecen las reglas de procedimiento y criterios para reglamentar la restricción de ciertas actividades en pastos marinos, y se dictan otras disposiciones. 31 de mayo de 2013. D.O. No. 48807.
- Delgado, I., & Lloyd, G. (2004). A simple low cost method for one person beach profiling. *Journal of Coastal Research*, 20(4), 1246–1252. <https://doi.org/10.2112/03-0067r.1>
- EMERY, K. O. (1961). A Simple Method of Measuring Beach Profiles. *Limnology and Oceanography*, 6(1), 90–93.
- Gómez García, Á. M. (2012). Geomorfología y procesos erosivos en playas de islas rocosas macromareales. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*.
- Greenwood, B., & Davidson-Arnott, G. (1975). Marine bars and nearshore sedimentary processes, Kouchi-bouguac Bay, New Brunswick. *Nearshore sediment dynamics and sedimentation*, 123-150.
- Guillén, J., & Díaz, J. I. (1990). Elementos morfológicos en la zona litoral: ejemplos en el delta del Ebro.
- Gutiérrez, O. (2011). Desarrollo de una metodología para el estudio de la morfología de playas basado en mapas auto-organizativos de imágenes digitales. TDR (Tesis Doctorales en Red).
- Hallermeier, R. J. (1981). Seaward limit of significant sand transport by waves: an annual zonation for seasonal profiles. COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER FORT BELVOIR VA.
- Huang, J., Jackson, D. W. T., & Cooper, J. A. G. (2002). Morphological Monitoring of a High Energy Beach System Using GPS and Total Station Techniques, Runkerry, Co. Antrim, Northern Ireland. *Journal of Coastal Research*, 36(36), 390–398. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.390>
- INVEMAR, CORPOURABÁ, GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA y CODECHOCÓ. 2008. Cartilla lineamientos y estrategias para el manejo integrado de la Unidad

- Ambiental Costera del Darién (UAC-Darién). Serie de Documento Generales del Inveemar No 2, Santa Marta. 30p
- INVEMAR, GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA, CORPOURABÁ y CODECHOCÓ. 2008. Formulación de los lineamientos y estrategias para el manejo integrado de la Unidad Ambiental Costera del Darién. Editado por: A.P. Zamora. A. López y P.C. Sierra-Correa. Santa Marta. 208 p + Anexos cartográficos + 5 Anexos digitales. (Serie de Documentos Generales INVEMAR No. 22)
- Klemas, V. (2011). Beach profiling and LIDAR bathymetry: An overview with case studies. *Journal of Coastal Research*, 27(6), 1019–1028. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00017.1>
- Krause, G. (2004). The “Emery-Method” revisited - Performance of an inexpensive method of measuring beach profiles and modifications. *Journal of Coastal Research*, 20(1), 340–346. [https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)20\[340:teroai\]2.0.co;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)20[340:teroai]2.0.co;2)
- Łabuz, T. A. (2016). A review of field methods to survey coastal dunes—experience based on research from South Baltic coast. *Journal of Coastal Conservation*, 20(2), 175–190. <https://doi.org/10.1007/s11852-016-0428-x>
- Mendoza, J., & Garza, J. B. (2009). La medición en el proceso de investigación científica: Evaluación de validez de contenido y confiabilidad (Measurement in the scientific research process: Content validity and reliability evaluation). *Innovaciones de negocios*, 6(11), 17-32.
- Moloney, J. G., Hilton, M. J., Sirguy, P., & Simons-Smith, T. (2018). Coastal dune surveying using a low-cost Remotely Piloted Aerial System (RPAS). *Journal of Coastal Research*, 34(5), 1244–1255. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00076.1>
- Montaño-Muñoz, J., Osorio-Arias, A. F., & Otero-Díaz, L. J. (2018). Patrones en las excursiones de swash en dos playas contrastantes: Playas Hollywood y Costa Verde, Colombia. *Dyna*, 85(204), 264-271.
- Moore, D. S., & Kirkland, S. (2007). *The basic practice of statistics (Vol. 2)*. New York: WH Freeman.
- Morton, R. A., Leach, M. P., Paine, J. G., & Cardoza, M. A. (1993). Monitoring Beach Changes Using GPS Surveying Techniques. *Journal of Coastal Research*, 9(3), 702–720. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pérez-Tejeda, H. E. (2008). *Estadística para las ciencias sociales, del comportamiento y de la salud*. *Innovación Educativa*, 8(45).

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. <https://doi.org/10.2112/06-0665.1>

Short, A.D. (1999). *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. New York: Wiley.

Unesco. (2012). *Guardarenas: Adaptarse al cambio climático y educar para el desarrollo sostenible*. Unesco, París.

Vidal, C., Losada, M.A., Medina, R. y Losada, L. (1995). Modelos morfodinámicos de las playas. *Ingeniería del Agua*, 2, 55-74.

Wind, Y., & Saaty, T. L. (1980). Marketing applications of the analytic hierarchy process. *Management science*, 26(7), 641-658.

10.1 Referencias adicionales

En algunos esquemas mostrados en representación de los métodos, se utilizaron fotografías extraídas de algunas páginas web, los links de referencias se muestran a continuación (*Tabla 18*) en relación al número de figura correspondiente:

Tabla 18. Referencias adicionales.

# Figura	Link de referencia
9	https://asequipos.com.co/producto/nivel-abney/
10	https://jmequipos.com/detalle.php?id=72
	https://www.tecnocéano.com/ecosonda-multihaz-multibeam.php
11	https://geodesical.com/tiendas/espana/niveles-digitales-topografia/100077-Nivel-Digital-TOPCON-DL-503.html
	https://civiltec.mx/product/teodolito-electronico-zipp02-de-2-mca-geomax/
12	https://spanish.alibaba.com/product-detail/foif-optical-theodolite-j2-2-angle-surveying-instrument-60658368379.html
13	https://civiltec.mx/product/teodolito-electronico-zipp02-de-2-mca-geomax/
14	http://www.jmequipos.com/ver_productos.php?prod=todo
	https://dhayi.com/portal/index.php/accesorios/kit-para-estacion-total/148-kit-cst-berger
15	https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-accuracy-gps-rtk-south-rtk-g1-plus-gps-gnss-rtk-surveying-instrument-1600117091264.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.72f5a921ZJS_uMA
16	https://www.geocom.cl/products/dji-matrice-300-rtk
	http://www.findglocal.com/DK/Thisted/538743992810878/Incendium-A-S
	https://www.geocom.cl/products/dji-matrice-300-rtk
17	https://www.tecnocéano.com/ecosonda-multihaz-multibeam.php
	https://www.nautica.com.uy/ecosonda-striker-7sv
18	https://es-la.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/laser-scanning-solutions

11. ANEXOS

11.1 ANEXO A: Evaluación de Factores Técnicos.

Tabla 19. Matriz de comparación - Factores Técnicos.

Criterio 1: Factores Técnicos RC=2%																
Nº	Alternativas	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
A	Método_Emery	1	3	2	1/2	2	3	5	5	5	5	4	5	6	7	4
B	Método_Delgado&Lloyd	1/3	1	1/2	1/4	1/2	1	3	3	3	3	2	3	4	5	2
C	Método_Andrade&Ferreira	1/2	2	1	1/3	1	2	4	4	4	4	3	4	5	6	3
D	Método_Puleo	2	4	3	1	3	4	6	6	6	6	5	6	7	8	5
E	Método_Chowdhury	1/2	2	1	1/3	1	2	4	4	4	4	3	4	5	6	3
F	Método_Nivel-Abney	1/3	1	1/2	1/4	1/2	1	3	3	3	3	2	3	4	5	2
G	Método_Nivel-Óptico	1/5	1/3	1/4	1/6	1/4	1/3	1	1	1	1	1/2	1	2	3	1/2
H	Método_Nivel-Electrónico	1/5	1/3	1/4	1/6	1/4	1/3	1	1	1	1	1/2	1	2	3	1/2
I	Método_Teodolito-Mecánico	1/5	1/3	1/4	1/6	1/4	1/3	1	1	1	1	1/2	1	2	3	1/2
J	Método_Teodolito-Electrónico	1/5	1/3	1/4	1/6	1/4	1/3	1	1	1	1	1/2	1	2	3	1/2
K	Método_Estación-Total	1/4	1/2	1/3	1/5	1/3	1/2	2	2	2	2	1	2	3	4	1
L	Método_DGPS	1/5	1/3	1/4	1/6	1/4	1/3	1	1	1	1	1/2	1	2	3	1/2
M	Método_RPAS	1/6	1/4	1/5	1/7	1/5	1/4	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1/2	1	2	1/3
N	Método_Ecosonda	1/7	1/5	1/6	1/8	1/6	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/4	1/3	1/2	1	1/4
O	Método_Escáner-Láser-Terrestre	1/4	1/2	1/3	1/5	1/3	1/2	2	2	2	2	1	2	3	4	1
Total		6.48	16.12	10.28	4.17	10.28	16.12	34.83	34.83	34.83	34.83	24.08	34.83	48.50	63.00	24.08

11.2 ANEXO B: Evaluación de Factores Operativos.

Tabla 20. Matriz de comparación – Factores Operativos.

Criterio 2: Factores Operativos RC=3.4%																
Nº	Alternativas	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
A	Método_Emery	1	4	4	1/2	3	4	6	1	8	6	1	2	3	7	4
B	Método_Delgado&Lloyd	1/4	1	1	1/5	1/2	1	3	1/4	5	3	1/4	1/3	1/2	4	1
C	Método_Andrade&Ferreira	1/4	1	1	1/5	1/2	1	3	1/4	5	3	1/4	1/3	1/2	4	1
D	Método_Puleo	2	5	5	1	4	5	7	2	9	7	2	3	4	8	5
E	Método_Chowdhury	1/3	2	2	1/4	1	2	4	1/3	6	4	1/3	1/2	1	5	2
F	Método_Nivel-Abney	1/4	1	1	1/5	1/2	1	3	1/4	5	3	1/4	1/3	1/2	4	1
G	Método_Nivel-Óptico	1/6	1/3	1/3	1/7	1/4	1/3	1	1/6	3	1	1/6	1/5	1/4	2	1/3
H	Método_Nivel-Electrónico	1	4	4	1/2	3	4	6	1	8	6	1	2	3	7	4
I	Método_Teodolito-Mecánico	1/8	1/5	1/5	1/9	1/6	1/5	1/3	1/8	1	1/3	1/8	1/7	1/6	1/2	1/5
J	Método_Teodolito-Electrónico	1/6	1/3	1/3	1/7	1/4	1/3	1	1/6	3	1	1/6	1/5	1/4	2	1/3
K	Método_Estación-Total	1	4	4	1/2	3	4	6	1	8	6	1	2	3	7	4
L	Método_DGPS	1/2	3	3	1/3	2	3	5	1/2	7	5	1/2	1	2	6	3
M	Método_RPAS	1/3	2	2	1/4	1	2	4	1/3	6	4	1/3	1/2	1	5	2
N	Método_Ecosonda	1/7	1/4	1/4	1/8	1/5	1/4	1/2	1/7	2	1/2	1/7	1/6	1/5	1	1/4
O	Método_Escáner-Láser-Terrestre	1/4	1	1	1/5	1/2	1	3	1/4	5	3	1/4	1/3	1/2	4	1
Total		7.77	29.12	29.12	4.66	19.87	29.12	52.83	7.77	81.00	52.83	7.77	13.04	19.87	66.50	29.12

11.3 ANEXO C: Evaluación de Factores Económicos

Tabla 21. Matriz de comparación – Factores Económicos.

Criterio 3: Factores Económicos CR=10%																
Nº	Alternativas	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
A	Método_Emery	1	2	2	2	2	4	5	8	5	6	9	9	7	9	9
B	Método_Delgado&Lloyd	1/2	1	2	2	2	3	4	7	4	5	9	9	4	9	9
C	Método_Andrade&Ferreira	1/2	1/2	1	1/2	2	2	3	6	3	4	7	9	4	9	9
D	Método_Puleo	1/2	1/2	2	1	2	3	4	7	4	5	9	9	4	9	9
E	Método_Chowdhury	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	3	6	3	4	7	9	4	9	9
F	Método_Nivel-Abney	1/4	1/3	1/2	1/3	1/2	1	3	5	3	3	6	8	4	9	9
G	Método_Nivel-Óptico	1/5	1/4	1/3	1/4	1/3	1/3	1	4	1	2	5	7	3	9	9
H	Método_Nivel-Electrónico	1/8	1/7	1/6	1/7	1/6	1/5	1/4	1	1/4	1/3	4	5	1/3	6	5
I	Método_Teodolito-Mecánico	1/5	1/4	1/3	1/4	1/3	1/3	1	4	1	2	5	7	3	9	9
J	Método_Teodolito-Electrónico	1/6	1/5	1/4	1/5	1/4	1/3	1/2	3	1/2	1	4	7	2	9	9
K	Método_Estación-Total	1/9	1/9	1/7	1/9	1/7	1/6	1/5	1/4	1/5	1/4	1	4	1/4	4	4
L	Método_DGPS	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/8	1/7	1/5	1/7	1/7	1/4	1	1/6	4	3
M	Método_RPAS	1/7	1/5	1/4	1/5	1/4	1/4	1/3	3	1/3	1/2	4	6	1	5	5
N	Método_Ecosonda	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/6	1/9	1/9	1/5	1/4	1/6	1	1/2
O	Método_Escáner-Láser-Terrestre	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/6	1/9	1/9	1/5	1/4	1/6	2	1
Total		4.53	6.32	9.81	7.82	11.31	16.96	25.65	54.78	25.65	33.45	70.65	90.50	37.08	103.00	99.50