



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS QUE
UTILIZAN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA PARA LA EVALUACIÓN
MULTITEMPORAL DE LA LÍNEA DE COSTA A
PARTIR DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES**

KEVIN FRANCO RICARDO

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020



COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS QUE UTILIZAN SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DE
LA LÍNEA DE COSTA A PARTIR DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Kevin Franco Ricardo

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesores (a):

Alfredo Jaramillo Vélez.

Ingeniero Ambiental; Magíster en Oceanografía.

Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera.

Ingeniero Civil; Especialista en mecánica de suelos y cimentaciones.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2020

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inmensamente a Dios por todas las bendiciones que me ha dado, por guiarme a lo largo de mi vida, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Agradecimiento especial a mis padres, Rodolfo y Dallys, y a mi hermano por ser los principales promotores de mis sueños y metas, por confiar y creer siempre en mí, por los consejos, valores y principios que me han inculcado.

A Maira, ese ser de luz que Dios ha colocado en mi camino, que, gracias a su apoyo incondicional, su paciencia y su amor me ayudó a concluir esta meta.

Gracias a toda mi familia, porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento me acompañan a culminar cada uno de mis proyectos.

Agradezco a los asesores de mi investigación, los profesores Alfredo Jaramillo y Carlos Gutiérrez, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a los docentes por haber compartido sus conocimientos y experiencias a lo largo de la especialización.

CONTENIDO

1. ANTECEDENTES.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo General.....	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. MARCO TEÓRICO.....	4
3.1 Línea de costa	4
3.2 Erosión Costera.....	4
3.3 Imágenes Multiespectrales como información para la evaluación multitemporal de la línea de costa.....	6
3.4 Metodologías para la identificación de la línea de costa utilizando SIG	9
3.5 Metodologías para la evaluación multitemporal de la línea de costa aplicando SIG .	12
4. METODOLOGÍA	15
5. ANÁLISIS Y DISCUSIONES.....	17
5.1 Análisis comparativo de sensores de escáner de imagen multiespectral	17
5.2. Análisis comparativo de técnicas de mejora de imágenes multiespectrales	21
5.3. Análisis comparativo de metodologías de identificación de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales	22
5.4 Análisis comparativo de metodologías de evaluación multitemporal de la línea de costa utilizando SIG.....	25
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	29
7. REFERENCIAS	32
ANEXOS	35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Satélites con más de cinco bandas multiespectrales.....	18
Tabla 2. Satélites con menos de cinco bandas multiespectrales.....	19
Tabla 3. Metodologías de extracción de la línea de costa.	23
Tabla 4. Metodologías de evaluación multitemporal de línea de costa.....	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composición de Imagen Landsat 8.....	7
Figura 2. Composición de Imagen Sentinel-2.....	7
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología de investigación.....	16

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. NDWI de McFeeters.....	10
Ecuación 2. NDWI de Xu.....	10
Ecuación 3. MNDWI de Xu.....	11
Ecuación 4. NDWI de tres bandas.....	11
Ecuación 5. Índice de agua costera.....	11

RESUMEN

La zona costera es un territorio con características especiales de importancia crítica para la supervivencia de especies de fauna y flora particulares de estos ecosistemas, a la vez que representan un gran potencial para el desarrollo de importantes actividades económicas. En el marco de las dinámicas costeras, existen presiones, naturales y antrópicas, que interrumpen el equilibrio natural de sus procesos, provocando que se presenten problemáticas en el litoral, como, la erosión costera. El análisis de la erosión costera se ha abordado de manera clásica como el cálculo de tasas de erosión, obtenida al medir la variación espacial en la posición (x, y) de dos líneas de costa para fechas diferentes. Actualmente, con las ventajas que ofrecen los sistemas de información geográfica – SIG, se han desarrollado diferentes métodos para evaluar los cambios espacio-temporales de la línea de costa. En la presente monografía, se realizó la comparación de metodologías que emplean SIG para la evaluación multitemporal de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales. Para ello, se consultaron publicaciones relacionadas con la temática de estudio, y se construyeron diferentes tablas comparativas donde se analizaron los principales sensores pasivos con escáner de imagen multiespectral, algunas técnicas de mejora de imágenes multiespectrales, las metodologías de extracción de la línea de costa, y las metodologías de evaluación multitemporal de la línea costera. A través de las discusiones generadas del análisis comparativo se logró presentar un balance de metodologías y tendencias de investigación utilizando sistemas de información geográfica para estudios de la variación multitemporal de la línea de costa.

Palabras clave: Erosión costera, Línea de costa, Sistemas de Información Geográfica, Imagen Multiespectral, Sensores Remotos.

ABSTRACT

Coastal zones are territories with special characteristics of critical importance for the survival of species of fauna and flora specific to these ecosystems, in turn, they denote great potential for the development of important economic activities. Talking about coastal dynamics, there are natural and anthropic pressures that interrupt the natural balance of its processes, causing problems to arise on the coast, such as coastal erosion. Coastal erosion analysis has traditionally been approached as the calculation of erosion rates, obtained by measuring the spatial variation in the position (x, y) of two shorelines for different dates. Currently, with the advantages offered by geographic information systems - GIS, different methods have been developed to evaluate the spatial and temporal changes of the coastline. In this monograph, a comparison of methodologies using GIS for multitemporal assessment of the coastline was made from multispectral images. For this, publications related to the study topic were consulted, and different comparative tables were constructed where the main passive sensors were analyzed with a multispectral image scanner, some techniques for improving multispectral images, the shoreline extraction methodologies, and the methodologies of multitemporal evaluation of the coastline. Through the discussions generated from the comparative analysis, it was possible to present a balance of methodologies and research trends using geographic information systems for studies of the multitemporal variation of the coastline.

Keywords: Coastal erosion, Shoreline, Coastline, Geographical information systems, Multispectral image, Remote sensing.

1. ANTECEDENTES

La zona costera es un territorio con características únicas y especiales de importancia crítica para la supervivencia de especies de fauna y flora particulares de estos ecosistemas, a la vez que representan un gran potencial para el desarrollo de importantes actividades económicas como la pesca, el turismo, la navegación, el desarrollo portuario, además de proporcionar bienes y servicios para la subsistencia de poblaciones locales (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés - INVEMAR, 2017).

Actualmente, entre el 50 y el 65 % de la población mundial vive en zonas costeras (Rangel-Buitrago & Posada-Posada, 2013; Rondón-Ramírez & Tavares-Correa, 2018). Las dinámicas de uso y aprovechamiento de los recursos que ofrecen las zonas de litoral, en conjunto con los factores físicos y fenómenos naturales que interactúan en estos territorios, ejercen diversas presiones y cambios en el medio, cambios que muchas veces suelen intensificarse por el mismo desconocimiento de la geomorfología de la costa y los agentes que la integran (Rondón-Ramírez, 2011).

Uno de los principales procesos naturales que ocurre en el litoral son la erosión y la acreción, entendiendo la erosión, como la pérdida de terrenos debido a la invasión del mar, en un lapso de tiempo lo suficientemente largo que permite descartar efectos temporales o cíclicos; mientras que la acreción, implica la acumulación de sedimentos y la consolidación de terrenos por encima del nivel de las mareas (Niño & Oviedo, 2018). Dichos procesos, pueden alterarse debido a cambios naturales extremos o por acciones antrópicas, desencadenando, entre otros problemas, la *erosión costera*.

Se estima que al menos el 70% de las playas arenosas del planeta sufren procesos erosivos o retroceso de la línea de costa, a la cual se ha catalogado como un problema global (Rondón-Ramírez, 2011), cobrando mayor importancia frente a los efectos del *Cambio Climático*, como, el aumento de la temperatura superficial del mar, el incremento del nivel medio del mar, la acidificación del medio ambiente marino, lo que asociado a una mayor frecuencia e

intensidad de eventos meteorológicos extremos (incidencia de huracanes, mares de leva, precipitaciones, sequías prolongadas) incrementaría los retrocesos de la línea de costa, modificaría los ecosistemas marinos y causaría afectaciones en las infraestructuras costeras, generando graves impactos a nivel ambiental, social y económico para estas regiones (INVEMAR, 2017; Ortiz-Malavasi, 2008).

A pesar de que existe una gran incertidumbre asociada a las magnitudes reales de los efectos que puede causar el cambio climático en la zona costera (Rangel-Buitrago & Posada-Posada, 2013), el panorama actual que se evidencia en muchas regiones del mundo, ha incentivado a los dirigentes y autoridades a incluir el cambio climático, como una importante variable, en la toma de decisiones y en la articulación entre diferentes instrumentos de gestión para propender la adaptación (INVEMAR, 2017). Los estudios de la erosión costera y la evaluación multitemporal de la línea de costa, ofrecen información de primera mano y sientan las bases para el desarrollo de Programas de Manejo Integrado Costero, así como contribuyen a la elaboración de Planes de Adaptación ante el Cambio Climático (Pais-Barbosa, Veloso-Gomes, & Taveira-Pinto, 2016).

Existen diferentes métodos para evaluar los cambios espacio-temporales que sufre una zona litoral en particular, pero gracias a los avances tecnológicos, el aprovechamiento de los *Sistemas de Información Geográfica – SIG*, han tomado mucha fuerza en los procesos de captura de datos, el geoprocésamiento y análisis de la información, así como también han favorecido el monitoreo, el modelado y la simulación de la zona costera (Rangel-Buitrago & Posada-Posada, 2013). No obstante, dada la diversa disponibilidad de fuentes y tipos de información, la variedad de métodos y herramientas SIG que contribuyen al análisis eficiente de los resultados, puede ser dispendioso e inclusive confuso, seleccionar o escoger la metodología adecuada para evaluar los cambios espacio-temporales de una línea costera en particular. Por lo tanto, a través de la presente monografía, se pretende realizar una comparación de metodologías que utilizan sistemas de información geográfica para la evaluación multitemporal de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales, describir las ventajas y desventajas de la aplicación de cada una de ellas, con el fin de contribuir al planteamiento metodológico de futuras investigaciones.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Comparar metodologías que emplean Sistemas de Información Geográfica – SIG para la evaluación multitemporal de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales.

2.2. Objetivos Específicos

- ❖ Identificar que metodologías aplican Sistemas de Información Geográfica para la evaluación multitemporal de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales.
- ❖ Describir las características de las metodologías que utilizan SIG para la evaluación multitemporal de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales.
- ❖ Establecer ventajas y desventajas de las metodologías encontradas que utilizan Sistemas de Información Geográfica para la evaluación multitemporal de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Línea de costa

La línea de costa, puede ser definida como el límite de contacto entre la superficie emergida y la oceánica, además, de constituirse como un elemento geográfico indispensable para cualquier estudio desarrollado en la zona litoral (Casal, Sánchez-Carnero, & Freire, 2010). No obstante, al intentar monitorear la línea de costa o investigar sus cambios a través del tiempo sobre un área de estudio en particular, usualmente los investigadores se ven obligados a discutir y concretar nuevamente lo que para ellos y su investigación será asumido como la línea de costa, debido a los diferentes indicadores asociados a esta variable, como por ejemplo la línea de marea alta (HTL), la línea de marea alta media (MHTL), la línea de marea baja (LTL) y la línea de marea baja media (MLTL), entre otros, aunque usualmente la línea de marea alta (HTL) es el indicador preferido para la delimitación de la costa, ya que es más fácil para la interpretación de imágenes y la ubicación en el campo (Mahapatra, Ramakrishnan, & Rajawat, 2015). Sin embargo, la ausencia de una metodología común que defina la representación a seguir en el trazado o modo de interpretar la línea de costa, seguirá provocando que este indicador varíe de unos estudios a otros (Casal et al., 2010).

No existe un límite exacto entre la tierra y el agua, por lo que la línea de costa es una característica que constantemente se encuentra cambiando su forma, posición y orientación, debido al efecto de diversos parámetros físicos como olas, mareas, corrientes, aumento de tormentas, y cambios en el nivel del mar (Selvan, Kankara, Prabhu, & Rajan, 2020), este último, que se viene intensificado por el cambio climático global, además, de factores inducidos por el ser humano, como el desgaste de barreras coralinas o destrucción de zonas de manglar, los asentamientos poblacionales, la construcción de infraestructuras portuarias y barreras de control erosivo, entre otras presiones antrópicas (Boateng, 2012). Debido a lo cual, se requiere monitorear a corto y largo plazo las variaciones de la línea de costa para establecer planes de manejo y control de estos territorios.

3.2 Erosión Costera

La erosión costera, puede ser entendida como el retroceso de la línea de costa preexistente con la consiguiente pérdida de sedimentos (Ojeda-Zújar, 2000), estos fenómenos erosivos se deben a causas como la elevación del nivel del mar, la intensificación de las tormentas oceánicas o a la presencia de obras de ingeniería construidas en la costa (Tavares & Drenkhan, 2010).

La diversidad ambiental que existe en la línea de costa está conformada por playas arenosas, costas rocosas, acantilados y humedales, entre otros, que, debido a las características geomorfológicas propias, responden de manera diferente a la dinámica litoral (Rondón-Ramírez, 2011). El desarrollo de la playa, es el producto de un balance positivo de sedimentos en la costa, administrado por el comportamiento de las olas y a partir de las corrientes generadas por estas. Generalmente, la playa se representa mediante un perfil transversal o perfil de playa, que permite identificar las unidades geomorfológicas desde el *backshore*, o playa posterior, hasta más allá del *offshore*, o la zona de rompientes (Tavares & Drenkhan, 2010).

Cuando una playa compuesta por un tamaño de partícula determinado y expuesta a condiciones constantes de oleaje, desarrolla un perfil transversal que no presenta ningún cambio neto con el paso del tiempo, a este evento se le conoce como perfil de equilibrio, en otras palabras, el perfil de equilibrio se refiere al estado más frecuente o repetitivo del perfil de playa (Tavares & Drenkhan, 2010).

En condiciones erosivas, principalmente bajo efecto de fuertes oleajes, los sedimentos se movilizan de la playa hacia el mar, pero posteriormente, con la disminución de la energía de las olas gran parte de estos sedimentos removidos regresan a la playa, de acuerdo con un comportamiento cíclico entre erosión y sedimentación. Sin embargo, en sectores intensamente ocupados, el perfil de equilibrio es imposible de ser alcanzado debido a la presencia de estructuras de protección que bloquean los procesos naturales en la dinámica litoral (Zhang, Douglas, & Leatherman, 2004).

La erosión costera representa una de las amenazas latentes para todas las áreas de litoral del mundo, en especial, de aquellas conformadas por sustratos arenosos. Aunque no toda la erosión costera está influenciada por el aumento del nivel del mar, algunos efectos del cambio climático que se han venido presentando a nivel global indudablemente intensificarán esta problemática, provocando procesos erosivos en áreas costeras actualmente estables, y exacerbará en áreas que actualmente experimentan erosión (Kalthar & Itaya, 2020; Sherein, Abbas, Tarek, & Safaa, 2020). Adicionalmente, el desconocimiento de las dinámicas del litoral, son la principal causa del aumento de los problemas de erosión costera, ya que derivan de la toma de decisiones erradas o la mala gestión de medidas de manejo y control en la zona costera.

Debido a la complejidad de análisis que puede enmarcar la influencia de cada agente o factor sobre una zona costera en particular, y el posterior intento de cuantificar o determinar la magnitud asociada, sin tratar de estimar valores de forma cualitativa, el análisis de la erosión costera se ha abordado de manera clásica como el cálculo de tasas de erosión, obtenida al medir la variación espacial en la posición (x, y) de dos líneas de costa para fechas diferentes. Este método según Ojeda-Zújar (2000), requiere que los datos o fuentes de información con los que se realizará la investigación permitan reconstruir la posición de la línea de costa en fechas pasadas, que se utilicen técnicas adecuadas para medir geoméricamente los cambios de la línea de costa, y que se empleen procedimientos analíticos para calcular las tasas de erosión.

3.3 Imágenes Multiespectrales como información para la evaluación multitemporal de la línea de costa

Diversos autores e investigadores emplean fuentes de datos espaciales, registros históricos, herramientas tecnológicas, aplicativos de software y/o Sistemas de Información Geográfica – SIG para resolver problemas geográficos complejos, tal y como lo pueden ser los estudios de evaluación multitemporal de la línea de costa y la determinación de las tasas de erosión costera (Aboulela, Bantan, & Zeineldin, 2020; Mahapatra et al., 2015).

Las fuentes de información utilizadas para resolver problemas geográficos pueden provenir de técnicas de *Teledetección*, que comprenden la captura a distancia de datos que se producen en la superficie de la Tierra. Usualmente la teledetección se divide en dos grandes grupos: Los sensores remotos pasivos, que miden la radiación electromagnética del sol y las radiaciones de la superficie de la tierra; y los sensores remotos activos, que cuentan con instrumentos que transmiten radiación artificial para iluminar la superficie de la tierra, que les permite, luego, absorber la energía artificial reflejada en conjunto con la energía natural del sol (Parece & Campbell, 2015).

Dependiendo de la escala temporal en la cual se desarrollan los estudios de erosión costera, así mismo se determinan las fuentes de información con las cuales se trabajará en la investigación. Por lo que, al evaluar cambios de la línea de costa antes de los años setenta (70's), solo se podrán encontrar registros cartográficos y en el mejor de los casos algunas fotografías aéreas; mientras que al requerir de geodatos recientes, se pueden encontrar tanto fotografías aéreas como toda una gama de información provenientes de diferentes sensores remotos pasivos y activos (Ojeda-Zújar, 2000).

Las productos de satélites de escáner de imagen multiespectral, son una de las fuente de datos más utilizadas para el análisis de los cambios de la línea de costa (Selvan et al., 2020). Este tipo de imágenes poseen diferentes *resoluciones, espacial, espectral, temporal y radiométrica*, las cuales pueden ser entendidas como la capacidad de registrar y discriminar información de detalle, por lo que se considera indispensable conocer cada una de ellas.

La *resolución espacial* es la capacidad que tiene un sensor para diferenciar el tamaño mínimo que debe tener un objeto para ser detectado en una imagen, usualmente, se relaciona con el píxel o elemento pictórico, y es la principal característica que se consulta de una imagen multiespectral, debido a que los objetos con valores inferiores a la resolución espacial no podrán ser apreciados ni individualizados con claridad (Chuvieco, 2008). Una interesante referencia serían los satélites comerciales de las series WORLDVIEW y KOMPSAT, y los satélites QUICKBIRD, GEOEYE-1, IKONOS-2, PLEIADES y DEIMOS-2, debido a que sus productos poseen resoluciones espaciales menores de cinco (5) metros e incluso algunos incluyen una banda pancromática con tamaños de pixeles inferiores a un (1) metro.

A modo de ejemplo, se presentan dos composiciones de imágenes multiespectrales en color real de dos satélites con diferentes resoluciones espaciales, la *figura 1* de una imagen de LANDSAT 8 capturada el 31 de enero de 2019, y la *figura 2* de una imagen de SENTINEL-2 capturada el 02 de enero de 2019. Dichas imágenes, aunque no fueron tomadas el mismo día, sí corresponden a fechas cercanas y de un mismo territorio, al municipio de Arboletes, localizado en la región del Urabá del Departamento de Antioquia.

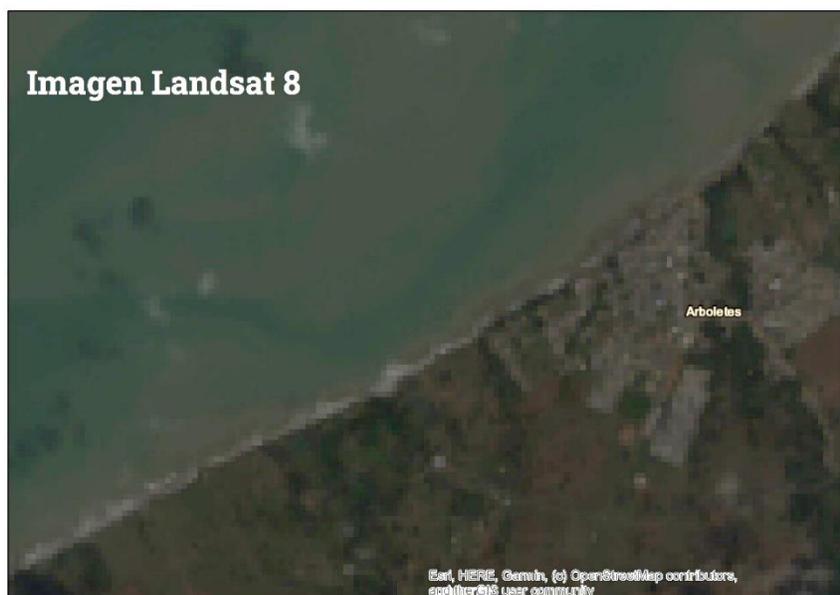


Figura 1. Composición de Imagen Landsat 8.
Fuente: Imagen descargada del portal Web *EarthExplorer*.



Figura 2. Composición de Imagen Sentinel-2.
Fuente: Imagen descargada del portal Web *EarthExplorer*.

Al comparar las figuras 1 y 2, es evidente la diferencia de resoluciones espaciales que presentan estos dos satélites, la imagen LANDSAT 8, con un tamaño de píxel de 30 metros permite diferenciar el territorio continental del mar, mostrando una línea de costa no muy detallada; mientras que la imagen de SENTINEL-2, que posee una resolución espacial de 10 metros, nos presenta mejores detalles sobre las coberturas terrestres, donde se pueden distinguir mejor las zonas urbanas, la división de parcelas rurales, y en especial, nos puede ayudar a identificar una línea de costa más precisa.

La *resolución espectral* es la capacidad que tiene un sensor para captar diversas bandas o franjas del espectro electromagnético (Chuvieco, 2008), es decir, que indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Esta es una de las características más importantes de los sensores de escáner de imagen multiespectral, ya que los satélites que proporcionan imágenes con un mayor número de bandas será más conveniente utilizarlos, debido a que pueden caracterizar las distintas cubiertas de la superficie. Como referencia, destacamos los satélites LANDSAT, SENTINEL-2 y la serie WORLDVIEW, pero en especial éste último, que posee una banda Pancromática, ocho (8) bandas multiespectrales en el rango del visible e infrarrojo cercano, ocho (8) bandas infrarrojas, además de doce (12) bandas dedicadas a la detección de nubes, aerosoles, vapores, hielo y nieve.

La *resolución temporal* se refiere a la frecuencia de la cobertura para una misma área que proporciona el sensor, en otras palabras, hace alusión a los periodos de tiempo en que tarda un satélite para capturar información sobre una misma superficie terrestre (Chuvieco, 2008). Esta característica depende de la forma de órbita del satélite, la altura, inclinación, velocidad y ángulo de observación, los cuales son diferentes para cada satélite dependiendo de los objetivos de su misión, por ejemplo, los satélites meteorológicos tienen resoluciones temporales de horas, ya que están obligados a suministrar información muy frecuente; mientras que los satélites para estudios ambientales o territoriales no requieren registrar en rangos de horas, por lo que su resolución temporal se presenta en rangos de días.

La *resolución radiométrica* se refiere a la variabilidad de intensidades en la radiancia espectral que es capaz de captar un sensor (Chuvieco, 2008). Para el caso particular de los satélites de múltiples bandas, la resolución radiométrica corresponde a los niveles de gris o niveles digitales que puede transformar cada sensor de escáner de imagen multiespectral, por ejemplo, los satélites de LANDSAT de la serie 1 a la 7, poseen 256 niveles digitales que varían de 0 a 255; mientras que el satélite LANDSAT 8 tiene hasta 65.355 niveles digitales. Otra forma de comprender la resolución radiométrica, podría hacerse recordando que el ojo humano no es capaz de diferenciar más de 64 niveles de gris, pero el análisis digital de una computadora puede trabajar con millones de ellos, aunque se ha demostrado que es suficiente trabajar tan sólo con 256 niveles digitales (Parece & Campbell, 2015).

Usualmente, la determinación de una metodología de investigación se realiza a partir de los datos disponibles para desarrollarla, por lo que, dependiendo de las características de la información y el alcance del estudio, se diseña el procedimiento metodológico. Dentro del proceso que conlleva a evaluar los cambios del litoral en un periodo de tiempo determinado,

se pueden diferenciar dos etapas importantes en la metodología: Inicialmente, se deben identificar o extraer las líneas de costa para cada una de las fechas a analizar, y, en segundo lugar, se deben medir las diferencias entre las líneas de costa extraídas previamente, así como también, algunos estudios incluyen el cálculo de las tasas de cambio del área costera. Opcionalmente, para cada una de las etapas se pueden aplicar métodos estadísticos a los datos y/o resultados de la investigación, con la finalidad de determinar la incertidumbre o los errores asociados.

3.4 Metodologías para la identificación de la línea de costa utilizando SIG

Algunas metodologías aplican procedimientos más subjetivos que otros, desarrollando ajustes manuales según el criterio del investigador, mientras que otras técnicas aprovechan las ventajas que ofrecen los programas informáticos de diseño asistido por computadora CAD y los softwares especiales de SIG, como, ArcGIS, QGIS, ERDAS Imagine, ENVI, entre otros, para extraer la línea de costa (Ojeda-Zújar, 2000).

Autores como Samanta & Paul (2016); INVEMAR (2017); Safaval, Zarkesh, Neshaei, & Ejlali (2018); Seghir, Marcou, & El Yacoubi (2018); Valderrama-Landeros, Blanco y Correa, Flores-Verdugo, Álvarez-Sánchez, & Flores-de-Santiago (2020) han utilizado un método manual para identificar la línea de costa, con apoyo de un software de procesamiento SIG, como ArcGIS o QGIS, desarrollaron composiciones de imagen con bandas multiespectrales en donde se pudiera evidenciar la división de la tierra y el agua (mar). Luego, crearon un archivo vectorial de tipo polilínea, y en modo edición realizaron el trazado de la línea de costa sobre las áreas de estudio de forma manual. Para minimizar posibles errores en la digitalización, sugieren acercarse con la herramienta de “zoom” hasta observar los píxeles de la imagen y así poder dibujar la línea de costa con mejor precisión. Al terminar de trazar el segmento de la costa, guardaron los cambios y detuvieron la edición de la polilínea. Este proceso fue realizado para todas las imágenes en los diferentes registros de tiempo en los cuales pretendían evaluar los cambios del litoral.

Aunque el método manual parece incluir mucha subjetividad al momento de delinear la línea de costa, se han propuesto técnicas para mejorar la calidad y resolución de las imágenes, con la finalidad de disminuir el error durante el proceso de digitalización. Samanta & Paul (2016) propone, antes de trazar la línea de costa, mejorar la resolución de los píxeles de las bandas multiespectrales aplicando técnicas como el estiramiento mínimo-máximo, el estiramiento de histograma y detección de bordes utilizando el software ERDAS Imagine. Safaval et al. (2018) por su parte, utilizó un filtro Laplaciano para realzar los rasgos lineales de la imagen compuesta, permitiéndole trazar la línea costera con mayor precisión. Liu, Wang, Ling, Xu, & Wang (2017) aplicaron la técnica *Pansharpening* o refinado pancromático, que consiste en utilizar la banda pancromática o PAN, la cual posee mayor resolución, y la combinaron con el resto de bandas de menor resolución generando una nueva imagen multibanda a color y preservando la máxima resolución. Esta técnica ya se encuentra integrada en muchos software y herramientas de SIG, o incluso hay disponibles extensiones para las imágenes

multiespectrales de los distintos satélites. Adicionalmente, Liu et al. (2017) implementaron 10 algoritmos de nitidez para mejorar la resolución espacial de una banda PAN, dentro de los cuales, los algoritmos *Modelo de inyección aditiva (inducción)*, *Aditivo Á Trous Wavelet Transform (ATWT)*, y *Aditivo Wavelet Luminance Proporcional (AWLP)* lograron reducir el tamaño del pixel de 15 m a 7,5 m de la banda pancromática de una imagen LANDSAT. Posteriormente, con la banda PAN mejorada aplicaron la técnica Pansharpening a las bandas multiespectrales, generando una representación más precisa y visualmente realista de la composición.

Existen técnicas de geoprocusamiento para extraer la línea de costa de forma automática, reduciendo la incertidumbre asociada al trazado del litoral costero cuando se realiza manualmente. El *índice de agua de diferencia normalizada* o *NDWI* por sus siglas en inglés, es un método que nos permite identificar de forma sencilla las masas de agua y zonas de elevada saturación de humedad por medio del análisis de imágenes multiespectrales, por lo que se ha utilizado ampliamente en la extracción de líneas de costa (Salaudín, Hossain, Tanim, Kabir, & Saddam, 2018).

El NDWI más referenciado por autores en sus publicaciones ha sido el propuesto por McFeeters (1996), quien utilizando la banda verde y la banda infrarroja cercana (NIR) de una imagen multiespectral y, con apoyo de un software para el procesamiento de imágenes RASTER, desarrolló una conversión no lineal que se puede expresar como:

Ecuación 1. NDWI de McFeeters

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Los resultados del índice se interpretan entendiendo que las superficies de agua tienden a dar valores positivos, mientras que las superficies que no son de agua tienen valores negativos. El límite que separa el agua y no agua se decide como indicador de línea de costa, y a partir de aquí puede transformarse la imagen binaria (RASTER) en un vector para poder extraerla como polilínea u obtener las áreas costeras como polígonos (Kalther & Itaya, 2020; Liu et al., 2017; Mishra et al., 2019; Salaudín et al., 2018).

También existen variantes del índice de agua de diferencia normalizado descrito por McFeeters, como el planteado por Xu (2006), que básicamente sustituyó la banda del Infrarrojo cercano (NIR) por la banda del Infrarrojo Medio (MIR), quedando expresado como:

Ecuación 2. NDWI de Xu

$$NDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}$$

Adicionalmente, Xu (2006) propuso una modificación del NDWI, descrito por él mismo, para poder utilizarlo en imágenes de LANDSAT 8 (OLI), para ello cambió la banda del Infrarrojo medio (MIR) por la banda del Infrarrojo de Onda Corta (SWIR), dando como resultado la expresión:

Ecuación 3. MNDWI de Xu

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1}$$

Recientemente, Aboulela et al. (2020) aplicaron un NDWI con tres bandas multiespectrales, con la banda verde, que es sensible a la turbidez del agua y ayuda a diferenciar las clases de vegetación; la banda del infrarrojo cercano (NIR), absorbida en el agua y además útil para diferenciar entre suelos secos y húmedos; y la banda del Infrarrojo de onda corta (SWIR), que muestra un alto contraste entre la tierra y el agua que discrimina el contenido de humedad en el suelo y la vegetación. Dicho NDWI se expresó como:

Ecuación 4. NDWI de tres bandas

$$NDWI = \frac{Green}{NIR} * \frac{Green}{SWIR1}$$

Por su parte, Ghorai & Mahapatra (2020) utilizaron una imagen LANDSAT 8 previamente corregida radiométricamente a través del modelo de sustracción de objetos oscuros (DOS), y luego de probar diferentes combinaciones, desarrollaron el “índice de Agua Costera” o CWI, como lo llamaron. El CWI utiliza las bandas del azul y del infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2), y se expresa como:

Ecuación 5. Índice de agua costera

$$CWI = \frac{Max(SWIR2) * Blue}{Max(Blue) * SWIR2}$$

Este modelo se utiliza para resaltar y diferenciar cuerpos de agua de la tierra, para lo cual se tienen en cuenta el valor de píxel más alto (Brillante) que representa los cuerpos de agua, y el valor de píxel más bajo que representa superficies terrestres.

Aunque existen muchas propuestas de índices de diferencia normalizado para identificar los cuerpos de agua, la mayoría de ellos presentan la desventaja al investigador, de tener que seleccionar el valor umbral o límite de distinción entre agua y tierra, ya que no es un valor constante y varía según los componentes de la cubierta terrestre (Liu et al., 2017). Debido a esto, varios autores recomiendan la aplicación de técnicas para identificar el valor umbral adecuado en imágenes binarias, como, por ejemplo, el propuesto por Otsu (1979), también llamado método Otsu, que selecciona automáticamente un umbral óptimo de una imagen gris

y el umbral maximiza la discrepancia entre clases; como resultado, los píxeles con valores iguales o superiores al valor umbral óptimo se dividen en “agua” y se les asigna valor de 1, mientras que los píxeles menores al umbral se clasifican como “no agua” o “tierra” y se puntúan con valor de cero (0). El límite de agua y no agua se decide como indicador de costa, y a partir de aquí, el RASTER binario puede ser transformado a capas vectoriales (Ghorai & Mahapatra, 2020; Kalthar & Itaya, 2020; Liu et al., 2017; Mishra et al., 2019).

Salauddin et al. (2018) utilizaron el método del valor umbral dinámico, que es una extensión del método local del valor umbral, en el que se define para cada pixel una zona vecina "N" a la que se le asigna un valor umbral adecuado " $t_{(N)}$ ", luego a través de un algoritmo de cálculo se determina el valor umbral de cada pixel. El valor umbral dinámico es un método más extenso de aplicar, pero muy estable frente a cambios de luminosidad. Por su parte Zhu & Zhang (2017), aplicaron un método de segmentación de umbral global y un clasificador supervisado por máquinas de soporte vectorial (SVM), que es un algoritmo de aprendizaje automático aplicado especialmente para problemas de clasificación y regresión. Dicho algoritmo, permite que se llenen los pequeños cuerpos de agua terrestre y que la línea de costa se rastree automáticamente. El método de segmentación de umbral se utiliza para encontrar el primer canal (T_0) de la onda formada en el histograma, el cual se toma como el umbral utilizado para segmentar la imagen de índice. Los resultados de la separación de la tierra y el mar después de la eliminación de cuerpos de agua terrestres, se convierten a vectores y se puede extraer la línea de costa.

3.5 Metodologías para la evaluación multitemporal de la línea de costa aplicando SIG

Existen aplicativos y herramientas de software diseñados particularmente para el análisis de la erosión costera; en los que factores como contar con una interfaz simple, la facilidad de utilizarlos, la disponibilidad gratuita o de bajo costo de licencias, y la funcionalidad, son tenidos muy en cuenta para su implementación en las investigaciones (Ojeda-Zújar, 2000). Dentro de las metodologías para la evaluación multitemporal del litoral, de manera similar a los métodos de extracción de la línea de costa, existen diferentes técnicas que se pueden implementar; algunas son más subjetivas que otras, pero generalmente se apoyan de los SIG para ejecutar los procesos de medición y cálculos.

Samanta & Paul (2016), compararon la información de las líneas de costa, extraídas previamente como polilínea, de dos imágenes multiespectrales (1990 y 2002) y un mapa topográfico (1972), y con apoyo del software ArcGIS, determinaron los cambios que había presentado la línea de costa. De manera similar Safaval et al. (2018), a partir de las capas vectoriales (Polilíneas y Polígonos) identificados anteriormente, utilizaron un software SIG para medir la distancia entre las dos líneas de costa y exhibieron los cambios morfológicos, además, utilizaron los polígonos para determinar las variaciones de áreas de erosión y sedimentación durante en el periodo de estudio.

Una de las herramientas de software más utilizadas por diversos investigadores es la *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*, diseñado por el *Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS)*, el cual se presenta como un complemento que funciona dentro del software de escritorio ArcGIS de ESRI, y permite calcular estadísticas de tasa de cambio desde múltiples posiciones históricas de la costa, proporciona un método automatizado para establecer ubicaciones de medición, realiza cálculos de tasas, proporciona los datos estadísticos necesarios para evaluar la solidez de las tasas e incluye un modelo beta de pronóstico de costa con la opción de generar horizontes de costa de 10 y/o 20 años (Himmelstoss, Henderson, Kratzmann, & Farris, 2018).

Salauddin et al. (2018) al igual que INVEMAR (2017), a partir de las capas vectoriales de líneas de costa extraídas previamente, prepararon dos archivos diferentes para cada año, uno de tipo polígono y otro polilínea. Los polígonos se utilizaron para calcular la tasa de erosión y acreción, mientras que el archivo de forma de polilínea se utilizó para medir el desplazamiento de la costa. Luego, establecieron una línea base de referencia, para poder identificar cuando las variaciones presentaran tendencias hacia la tierra o hacia el mar. Los métodos estadísticos utilizados para cuantificar el desplazamiento de la línea de costa fueron: *el movimiento neto de la costa (NSM)* y *la tasa de punto final (EPR)*, donde NSM es la distancia total entre el litoral más reciente y el más antiguo en cada transecto en unidad de metro, mientras que el EPR es la tasa que se calcula dividiendo el movimiento neto por el tiempo transcurrido en el litoral más antiguo y más reciente en cada transecto en unidades de metros por año. Dichos métodos, incluidos en la herramienta DSAS, arrojaron las tendencias evolutivas de la línea de costa, y las tasas de erosión y acreción del área costera para el periodo de tiempo analizado.

Valderrama-Landeros et al. (2020) destaca que la herramienta DSAS proporciona cinco operaciones estadísticas para cuantificar la variabilidad de la línea de costa: *la tasa de punto final (EPR)*, *la mediana mínima de cuadrados (LMS)*, *la tasa de regresión lineal (LRR)*, *el movimiento neto de la línea de costa (NSM)* y *la envoltura de cambio de línea de costa (SCE)*. Sin embargo, en su investigación, utilizaron solamente el EPR y NSM para obtener la distancia total de movimiento de la línea de costa y los valores de tasas de erosión y acreción.

Mishra et al. (2019) por su parte, seleccionaron tres métodos estadísticos para calcular el cambio de la línea de costa: *la tasa de punto final (EPR)*, para cambios a corto plazo (Cada 5 años), y *la tasa de regresión lineal (LRR)* y *la regresión lineal ponderada (WLR)* para cambios a largo plazo (25 años). El EPR, se aplica para el análisis de cambio de costa a corto plazo porque divide la distancia del movimiento de la costa por el tiempo transcurrido entre la costa más antigua y la más reciente; el LRR, se usa para calcular la tasa media de cambio de las posiciones de la costa cambiadas con el tiempo y también se ajusta mejor a la línea de regresión lineal de la estadística de cambio de todos los puntos de la costa de cada transecto; y el WLR, que básicamente es similar al LRR, pero se le agrega un valor de peso equivalente a las incertidumbres asociadas con cada línea de costa. Dicho peso (w) se define como una función de la varianza en la incertidumbre de la medición, Mishra et al. (2019), tuvieron en cuenta la resolución espacial del sensor para el cálculo de la incertidumbre.

Selvan et al. (2020) aplicaron solamente el método de *regresión lineal ponderado (WLR)* para calcular las tasas de cambio de la línea de costa. Para ello tomaron la pendiente de la línea de regresión (ajustando una línea de regresión de mínimos cuadrados) para todos los transectos a lo largo de la costa, luego, asignaron un valor de peso (w) a los datos de la línea de costa teniendo en cuenta las incertidumbres de medición y de posición involucradas en la obtención de los datos. Los conjuntos de datos de resolución fina (mayor calidad) recibieron más peso o énfasis para determinar la mejor línea de ajuste en comparación con los conjuntos de datos poco confiables o deficientes, es decir, la línea de regresión se puede colocar de tal manera que se minimice la suma de los residuos al cuadrado. Las tasas de cambio calculadas, pueden ser confiables sólo cuando se determinan los errores de la medición, lo que garantiza la precisión en todas las posiciones de la costa (Selvan et al., 2020).

Otros autores, han considerado la implementación de modelos matemáticos que simulen el comportamiento de los factores naturales relacionados con los procesos de erosión y acreción costera, con el objetivo, no sólo de calcular o medir los cambios de la costa, sino también de poder estimar las variaciones futuras. Seghir et al. (2018), superpusieron las líneas de costa (capas vectoriales) extraídas de imágenes multiespectrales para las diferentes fechas a evaluar, y aplicaron un *modelo de sedimentación* acoplado a un *modelo hidrodinámico* basado en el *método Lattice-Boltzmann* (Marcou et al., 2013), lo que les permitió evaluar cualitativamente las variaciones del nivel de agua en el litoral. Recientemente Aboulela et al. (2020), a partir de las capas vectoriales extraídas, aplicaron cuatro técnicas de regresión lineal para predecir los cambios a futuro del área de estudio: Un *Modelo de regresión Lineal*, un *Modelo de regresión Logarítmico*, un *Modelo de regresión Inverso*, y un *Modelo de regresión de Potencia*, a cada uno de los modelos les calcularon el error utilizando la *desviación absoluta media (MAD)* y el *error medio cuadrático (MSE)*. Finalmente, seleccionaron las distribuciones con el menor error al cuadrado y la ecuación proporcionada por el analizador de entrada lo utilizaron para predecir variaciones futuras en las fronteras costeras del área de estudio.

4. METODOLOGÍA

A través de la presente monografía de investigación, se realizó una consulta sistemática de metodologías utilizadas para la evaluación multitemporal de la línea de costa empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Con base en la temática particular de estudio se consultaron fuentes secundarias de información, principalmente artículos científicos, publicaciones de revistas indexadas, libros y documentos de instituciones o entidades confiables.

Durante la búsqueda de información se priorizaron los trabajos que, dentro de los objetivos de su investigación, utilizaran imágenes multiespectrales como datos de estudio, plantearan métodos de identificación o extracción de la línea de costa y emplearan metodologías para la evaluación multitemporal del litoral con apoyo de los SIG.

En el proceso de revisión de las referencias consultadas, se optó por la construcción de una tabla con la información relevante o menciones significativas de metodologías a tener en cuenta para el análisis comparativo. Donde, adicionalmente, se incluyeron los tipos de sensores remotos de escáner de imagen multiespectral.

Se construyeron tres cuadros comparativos, los cuales se presentan en la sección de *Anexos*, y adicionalmente, se incluyeron como tablas resúmenes en el documento. A continuación, se describen cada uno de los cuadros comparativos:

Anexo 1. Comparación de sensores remotos de escáner de imagen multiespectral, aquí se tuvieron en cuenta los diferentes tipos de satélites de imágenes multiespectrales, incluyendo, tanto los sensores que han sido utilizados en investigaciones revisadas como aquellos que sus productos representan un potencial significativo para desarrollar estudios de evaluación multitemporal de la línea de costa a través de la utilización de imágenes multiespectrales. Dichos satélites fueron divididos en dos grupos, según la resolución espectral, un primer grupo de imágenes con más de cinco bandas multiespectrales y un segundo grupo de imágenes con menos de cinco bandas multiespectrales. A cada satélite se le describieron las principales características, se mencionó la disponibilidad de sus datos y los preprocesamientos con los que se adquieren sus productos.

Anexo 2. Comparación de metodologías de identificación o extracción de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales, en esta tabla se tuvieron en cuenta solamente las metodologías consultadas, de las cuales, se describieron brevemente los procedimientos de su implementación, y se mencionaron las referencias de autores.

Anexo 3. Comparación de metodologías de evaluación multitemporal de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales, en esta tabla sólo se incluyeron las metodologías identificadas en la revisión, se describieron brevemente los procedimientos de aplicación y se relacionaron las referencias de autores.

Finalmente, para cada una de los cuadros se analizaron y describieron las ventajas y desventajas, las cuales se incluyeron como columnas adicionales en los respectivos cuadros. La *figura 3*, muestra un diagrama de flujo sobre el proceso metodológico realizado en la presente monografía.

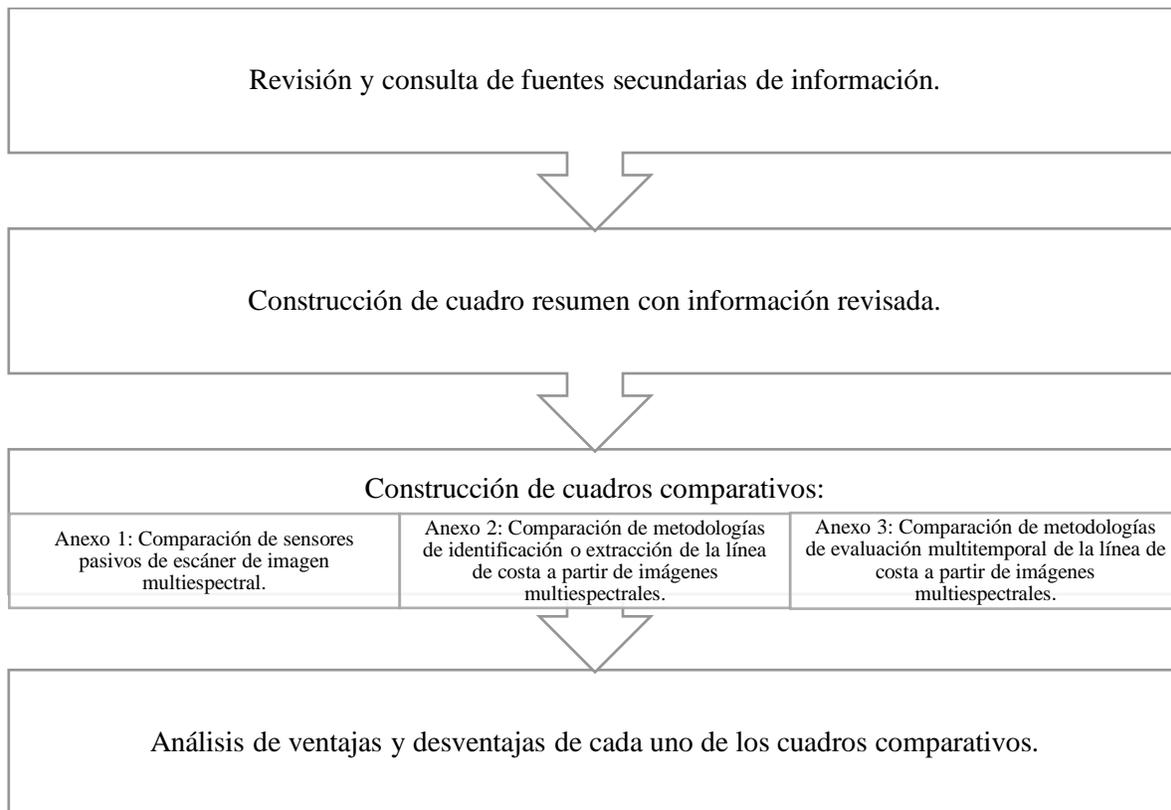


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología de investigación.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIONES

A continuación, se presentarán los análisis y discusiones sobre las comparaciones entre los tipos de satélites multispectrales, las técnicas de mejora de las imágenes multispectrales, las metodologías de extracción de la línea de costa y las metodologías de evaluación multitemporal de la línea costera.

5.1 Análisis comparativo de sensores de escáner de imagen multispectral

Dentro de la Teledetección Pasiva u Óptica, los sensores que capturan información a través de mecanismos de escáner de imagen multispectral representan un importante grupo de fuentes de datos. Estos sensores se han integrado principalmente en satélites, por lo que usualmente operan en plataformas espaciales, lo que les permite monitorear continuamente la superficie de la tierra. Los sensores de escáner de imagen multispectral, producen imágenes que capturan información en diferentes rangos del espectro electromagnético, ofreciendo una mejor caracterización de las diversas coberturas terrestres.

Cada uno de los satélites que operan con escáner de imagen multispectral, poseen resoluciones que lo diferencian de otros satélites de teledetección. En el presente estudio, se dividieron teniendo en cuenta la resolución espectral, es decir, el número de bandas espectrales que puede capturar cada sensor. Por tal motivo, se clasificaron en sensores pasivos de escáner de imagen multispectral con menos y más de cinco (5) bandas.

Los satélites con un número de bandas espectrales mayores a cinco, por tener mejor resolución espectral, suelen contar con menor resolución espacial, lo cual, en estudios de variaciones espacio-temporales de la línea de costa pueden reducir la precisión de los resultados. En este primer grupo destacan los satélites de la serie LANDSAT, la constelación SENTINEL-2, y las series de satélites WORLDVIEW 2 y 3, los cuales ofrecen imágenes multispectrales, distribuidas en el rango del espectro visible (Red, Green, Blue), infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo de onda corta (SWIR), una banda pancromática (PAN) de mayor resolución, entre otras bandas que varían según los objetivos de cada satélite. La *Tabla 1* resume las características de dichos sensores y está basado en el cuadro comparativo del *Anexo 1*.

Tabla 1. Satélites con más de cinco bandas multiespectrales

Satélites	Resolución	Resolución	Periodo en órbita	Disponibilidad de los datos
	Espacial Banda Pancromática	Espacial Bandas Multiespectrales		
Landsat	15 m	30 m	1972 - Actualidad	Libres
Sentinel-2	N/A	20 m	2015 - Actualidad	Libres
WorldView-2	0,46 m	1,85 m	2009 - Actualidad	Comerciales
WorldView-3	0,31 m	1,24 m	2014 - Actualidad	Comerciales

Los satélites LANDSAT poseen un amplio periodo de registro, alrededor de unos 50 años generando información, lo cual es importante cuando se estudian variaciones de la línea de costa en periodos de tiempo mayores a los 30 años. Sin embargo, las imágenes LANDSAT tienen la resolución espacial más baja, por lo que muchos autores desarrollan técnicas alternativas de mejora de imagen para reducir el tamaño de los píxeles y así contribuir a la disminución de la incertidumbre en los resultados. No obstante, ha sido el libre acceso a las imágenes LANDSAT, la condición que los ha posicionado como un importante referente de información geoespacial.

Por su parte, SENTINEL-2, compuesto por dos satélites de órbita polar, también ha ganado la atención de la comunidad académica e investigadora, gracias al libre acceso de sus imágenes. Aunque está cerca de cubrir los 5 años de observación de la superficie terrestre, posee mejores resoluciones espaciales y espectrales que los satélites de la serie LANDSAT. Para los estudios de cambios en la línea de costa en periodos de tiempo cortos y de fechas recientes, trabajar con imágenes de SENTINEL-2 puede ser una mejor alternativa que utilizar LANDSAT. Además, es importante aclarar, que, aunque los satélites de SENTINEL-2 no poseen una banda pancromática de mejor resolución, las bandas del rango visible e infrarrojo, de tamaños de pixel de 10 metros, pueden utilizarse para mejorar la resolución del resto de bandas a través de técnicas como el *pansharpening*.

Los satélite WorldView-2 (WV-2) y WorldView-3 (WV-3) poseen resoluciones espaciales que favorecen la precisión, tanto en el proceso de identificación o extracción de la línea de costa, como también en la determinación de sus variaciones o el cálculo de las tasas de erosión. Debido a que los datos de WV-2 y WV-3 son comercializados, su utilización en publicaciones relacionadas con la evaluación multitemporal de la línea de costa ha sido escasa o casi nula, sin desmeritar, que estos satélites brindan servicios de captura de imágenes por encargo y los productos de dichos sensores siempre pueden considerarse como referentes de verificación para los resultados obtenidos con imágenes de otros satélites.

Los satélites que poseen menos de cinco (5) bandas espectrales, coinciden en que todos sus datos se ofrecen de forma comercial, sin embargo, de manera opuesta al primer grupo de satélites, al tener menor número de bandas espectrales sus resoluciones espaciales suelen ser mejores. En este grupo incluimos el satélite GEOEYE-1, QUICKBIRD, IKONOS-2, PLEIADES, DEIMOS-2, los satélites SPOT de la serie 2 a la 7, además, de dos satélites

orientales que cuentan con sensores de escáner de imagen multiespectral, IRS-P6 o RESOURCESAT-1 y los satélites KOMPSAT de la serie 2 a la 3A. La *Tabla 2* resume las características de estos satélites, y a su vez, está basado en el cuadro del *Anexo 1*.

Tabla 2. Satélites con menos de cinco bandas multiespectrales

Satélites	Resolución Espacial Banda Pancromática	Resolución Espacial Banda Multiespectral	Periodo en órbita	Disponibilidad de los datos
GEOEYE-1	0,41 m	1,65 m	2008 - Actualidad	Comerciales
QUICKBIRD	0,61 m	2,4 m	2001 - 2015	Comerciales
IKONOS-2	0,8 m	3,2 m	1999 -2015	Comerciales
PLEIADES	0,7 m	2,8 m	2011 - Actualidad	Comerciales
DEIMOS-2	1 m	3 m	2014 - Actualidad	Comerciales
SPOT 2, 3 y 4	10 m	20 m	1990 - 2013	Comerciales
SPOT-5	2,5 y 5 m	10 m	2002 - 2015	Comerciales
SPOT 6 y 7	1,5 m	6 m	2012 - Actualidad	Comerciales
IRS-P6	5,8 m	23 m	2003 - 2013	Comerciales
KOMPSAT-2	1 m	4 m	2006 - Actualidad	Comerciales
KOMPSAT-3	0,5 m	2 m	2012 - Actualidad	Comerciales
KOMPSAT-3A	0,4 m	1,6 m	2015 - Actualidad	Comerciales

Todos los satélites de este grupo poseen una banda pancromática de significativa resolución espacial, además, de incluir bandas multiespectrales con muy buenas resoluciones, lo que los convierte en importantes fuentes de información para ser utilizados en estudios de evaluación multitemporal del litoral. La precisión de observación, en centímetros, que pueden ofrecer las imágenes de, por ejemplo, los satélites GEOEYE-1, QUICKBIRD, IKONOS-2, PLEIADES, DEIMOS-2, KOMPSAT-3 y KOMPSAT-3A, contribuyen a reducir significativamente las incertidumbres asociadas al cálculo de tasas de erosión y las distancias de variabilidad de la línea de costa, en contraste de utilizar imágenes con tamaños de píxel mayores a 10 metros, como, los satélites SENTINEL-2 y LANDSAT.

Adicionalmente, los satélites que se encuentran en órbita y que brindan servicios de captura de imágenes por encargo, como GEOEYE-1, PLEIADES, DEIMOS-2, SPOT-6, SPOT-7, y la serie KOMPSAT, permiten la adquisición de imágenes con el menor porcentaje de nubosidad para un área específica e incluso facilitan la planificación de la toma de imágenes en las fechas más convenientes para la investigación.

Al centrarnos en la resolución temporal de los satélites con menos de cinco bandas espectrales, sobresalen la serie de satélites SPOT 2, 3 y 4, por su significativo periodo de registro, consolidando información por alrededor de 20 años, los cuales, a pesar de ser los satélites con menor resolución espacial en este grupo, se rescata la uniformidad que

mantuvieron en el tamaño de pixel de sus imágenes. Esta característica, es importante tener en cuenta para disminuir errores en los resultados, como, cuando se trabaja con imágenes de diferentes resoluciones espaciales.

No obstante, las series posteriores de SPOT no mantuvieron la uniformidad en el tamaño de pixel de sus imágenes, debido a que el satélite SPOT-5 contó con mejor resolución espacial en sus bandas multiespectrales y su banda Pancromática, además, de que se le añadió una banda modo super pancromática con resolución de 2,5 metros. Afortunadamente, antes de salir de operación el satélite SPOT-5, se lograron lanzar al espacio las series de satélites SPOT-6 y SPOT-7, en los años 2012 y 2014, respectivamente. Dichos satélites han permitido continuar con el levantamiento de información de la superficie de la tierra que inició el SPOT-2 en el año 1990.

En este análisis, se incluyó también, el satélite IRS-P6 o RESOURCESAT-1, el cual ha sido utilizado por investigadores, como, Selvan et al. (2020), en estudios de variaciones de línea de costa. El IRS-P6 es un satélite de la Organización de Investigación Espacial India – IRSO, y estuvo en órbita alrededor de 10 años, entre 2003 y 2013. Aunque la resolución espacial de las bandas multiespectrales de este satélite son las más bajas de este grupo, sí poseen una importante resolución espacial en la banda pancromática, la cual puede contribuir a la mejora de la calidad de las bandas multiespectrales, si se le aplican técnicas como el Pansharpening.

Para los estudios de evaluación multitemporal de línea de costa, tanto la resolución espacial como el periodo de registro histórico, que puede ofrecer un mismo satélite, representan condiciones claves al momento de escoger las fuentes de datos para este tipo de investigaciones. Dichas condiciones, son cumplidas en gran medida por el satélite WorldView-2, que lleva en órbita desde el año 2009 y posee muy buenas resoluciones espaciales tanto en la banda pancromática como en el resto de bandas. Además, cuenta con más de cinco bandas multiespectrales que ofrecen la posibilidad de desarrollar diversas composiciones de imágenes o incluso aplicar metodologías de extracción de la línea de costa empleando distintos índices de agua de diferencia normalizada. Por su parte, si el número de bandas multiespectrales no es relevante para la metodología a desarrollar, el satélite KOMPSAT-2 también puede ser una importante alternativa, ya que se encuentra en órbita desde el año 2006 y posee resoluciones espaciales considerables para los estudios de variabilidad de la línea de costa. No obstante, la adquisición de datos de libre acceso generalmente está por encima de los datos comerciales, así se evidencia en el volumen de publicaciones que han empleado preferiblemente imágenes multiespectrales gratuitas, provenientes de satélites como LANDSAT y SENTINEL-2, el primero de estos, con el mayor registro histórico que puede ofrecer un satélite de escáner multiespectral.

5.2. Análisis comparativo de técnicas de mejora de imágenes multiespectrales

En algunas de las metodologías de extracción o identificación de la línea de costa, se observó la aplicación de técnicas para mejorar la resolución de las imágenes multiespectrales utilizadas en dichos estudios. Normalmente, este tipo de técnicas de mejora de imágenes son realizadas con apoyo de softwares SIG, aportando resultados satisfactorios en el suavizado de la imagen o realce de los píxeles, aunque también, se han utilizado técnicas orientadas a la mejora de la resolución espacial de las imágenes, logrando reducir el tamaño de pixel considerablemente.

Cuando se desea evaluar cambios de la línea de costa a través de un periodo de tiempo, los tipos de datos a utilizar deben contar con buena resolución espacial, ya que la línea de costa, dependiendo de las dinámicas y presiones, naturales o antrópicas, a las que está sometida, puede desencadenar variaciones mayores a los 10 metros o, por el contrario, puede presentar cambios de posición menores a los 5 metros. Para este último caso, poder determinar las tasas de cambio de una línea de costa, requerirá de la utilización de imágenes multiespectrales de muy buena resolución espacial, de lo contrario, por el tamaño de pixel difícilmente se podrá obtener un dato preciso.

Las técnicas de *estiramiento mínimo-máximo*, y de *estiramiento de histograma*, son técnicas de suavizado que permiten reducir contrastes abruptos en la imagen, provocando efectos de difuminación que, al complementarse con la técnica de *detección de bordes*, detectan zonas de variación en la imagen con mayor facilidad. Dichas técnicas, se pueden desarrollar desde distintos softwares SIG, aunque, se recomienda utilizar el software ERDAS Imagine.

El *filtro Laplaciano*, es otra técnica de mejora de imagen, aunque, igual que las técnicas mencionadas anteriormente, no reduce el tamaño de pixel de la imagen por lo que la resolución espacial seguirá siendo igual. El filtro Laplaciano, realza los detalles borrosos y mejora las características lineales en cualquier dirección de una imagen multiespectral, lo cual, en procesos de extracción de la línea de costa, facilita ampliamente la delimitación del litoral. Sin embargo, la aplicación de este filtro también realza el ruido de la imagen, por lo que, si no es tratado adecuadamente, podría afectar posteriores geoprocesamientos con la imagen resultante.

El *Pansharpening* o técnica de *refinado pancromático*, es tal vez, la técnica de mejora de imágenes multiespectrales más reconocida, tan conocida y utilizada, que se encuentra incluida como herramienta o extensión en la mayoría de los softwares SIG con soporte de datos tipo RASTER. Esta técnica aprovecha la banda pancromática o PAN, una banda que captura imágenes en escala de grises pero que posee mejor resolución espacial que el resto de bandas, la cual se utiliza para combinar con una composición de bandas multiespectrales. El pansharpening, permite que la imagen resultante conserve los colores de la composición de bandas, pero con una mejor resolución espacial.

Adicional a las técnicas mencionadas anteriormente, se destaca la investigación desarrollada por Liu et al. (2017), quienes aplicaron diez (10) algoritmos de nitidez para mejorar la resolución espacial de la banda pancromática de una imagen de LANDSAT-8. En su estudio resaltan los resultados obtenidos con tres algoritmos, con los cuales pudieron disminuir el tamaño de pixel de 15 m a 7,5 m de una banda PAN, y posteriormente, con la banda pancromática mejorada, aplicaron la técnica pansharpening a una composición de bandas multiespectrales.

Las técnicas de mejora de imágenes multiespectrales, pueden carecer de importancia cuando se trabaja con imágenes satelitales de muy buena resolución espacial, no obstante, considero que representan una oportunidad de mejora significativa para cualquier tipo de imagen, favoreciendo aún más la precisión de los resultados y la reducción de las incertidumbres asociadas a la calidad de la imagen.

5.3. Análisis comparativo de metodologías de identificación de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales

Antes de evaluar los cambios espacio-temporales en el litoral utilizando Sistemas de Información Geográfica – SIG, se requiere, extraer la línea costera en cada una de las imágenes de diferentes fechas del periodo de evaluación. Usualmente, se utilizan dos imágenes satelitales para un rango de tiempo específico, es decir, una imagen del año inicial y otra imagen del año final, aunque también, para estudios de largos periodos de tiempo, como, por ejemplo, mayores de 20 años, se evalúan los cambios en periodos fraccionados cada 5 o 10 años.

Al trabajar con imágenes multiespectrales, existen ciertos métodos de extracción o identificación de la línea de costa que se han documentado, algunos de los cuales se han venido utilizando y adaptando desde hace décadas, mientras que otras metodologías se han planteado recientemente como nuevas alternativas aprovechando el avance tecnológico y desarrollo de los SIG.

Las metodologías que se tuvieron en cuenta para el análisis comparativo de la presente monografía fueron: el Método Manual, el NDWI de McFeeters (1996) en conjunto con el método Otsu (1979), el NDWI y MNDWI de Xu (2006) junto con el método del valor umbral dinámico, el NDWI en conjunto con el método de segmentación de umbral y un clasificador por máquinas de soporte vectorial (SVM), el NDWI con tres bandas multiespectrales, el índice de Agua Costera (CWI) de Ghorai & Mahapatra (2020) junto con el método Otsu (1979) y la aplicación de filtros morfológicos, Técnicas de Segmentación Semiautomatizadas, y Determinación de la línea de costa en el nivel de agua más alta promedio (MHHWL). La *Tabla 3* describe las ventajas y desventajas de las metodologías de extracción de la línea de costa mencionadas, la cual está basada en el cuadro *Anexo 2*.

Tabla 3. Metodologías de extracción de la línea de costa.

Metodologías	Ventajas	Desventajas
Método Manual	Es el procedimiento más sencillo y ágil para delinear la línea de costa. También puede ser aplicado en fotografías aéreas.	Se deben considerar incertidumbres asociadas al proceso de digitalización manual de la línea de costa.
NDWI + Método Otsu	Clasifica automáticamente los píxeles de agua y tierra. No presenta incertidumbres asociadas a la digitalización manual.	Se deben considerar incertidumbres asociadas a la posible mala interpretación por el software SIG de píxeles aislados o cercanos al valor umbral.
NDWI y MNDWI + Método de valor umbral dinámico	Es más restrictivo en la clasificación de los píxeles de agua y tierra. Reduce la incertidumbre de posibles píxeles mal interpretados por el software.	Sólo se ha documentado la efectividad de sus resultados utilizando imágenes LANDSAT 5, 7 y 8. Al utilizar otras fuentes de datos espaciales, se debe considerar incluir imágenes de referencia para verificar los resultados.
NDWI + Método de segmentación de umbral + Clasificador SVM	El algoritmo elimina los cuerpos de agua que no son adyacentes al océano, permitiendo que el NDWI sea uniforme y favorezca la extracción más precisa de la línea de costa. El código del algoritmo se encuentra disponible en internet.	Es un método complejo de aplicar. Se deben tener buenas bases de programación para poder ajustar el código a las necesidades de la investigación y los datos espaciales disponibles.
NDWI con tres bandas multiespectrales	Maximiza la distinción entre las secciones positivas y negativas del NDWI resultante, permitiendo identificar el límite entre ambas clases sin necesidad de utilizar métodos de detección del valor umbral.	Requiere que las imágenes multiespectrales posean la banda del Infrarrojo de Onda Corta o SWIR.
CWI + Método Otsu + Filtro morfológico	El filtro de matriz de convolución para mejorar el NDWI se encuentra incluido como herramienta de procesamiento en algunos softwares SIG, lo que facilita su implementación.	Requiere que las imágenes multiespectrales posean la banda del Infrarrojo de Onda Corta o SWIR.
Técnicas de Segmentación Semiautomatizada	Reduce la incertidumbre asociada a la mala interpretación de los píxeles por el software SIG al aplicar modelos automáticos, y también reduce el error de digitalización manual.	Requiere que se realice reconocimiento en campo del área de estudio, para poder contrastar los resultados procesados por el software SIG.
Determinación de línea de costa en MHHWL	La línea de costa resultante es calibrada en la posición de la marea en el MHHWL, reduciendo las incertidumbres asociadas a los resultados de la extracción manual o automática.	Requiere datos de estaciones de mediciones de mareas cercanas al área de estudio, para poder calcular la posición MHHWL.

No se puede afirmar que, entre las metodologías relacionadas anteriormente, se encuentra el método absoluto y definitivo para la extracción o identificación de la línea de costa aplicable a cualquier estudio que utilice imágenes multiespectrales. Sin embargo, si se pretenden presentar las principales metodologías que se han utilizado para obtener la línea costera a partir de datos de sensores de escáner de imagen multiespectral.

El método manual, aunque se reconoce como el procedimiento más sencillo de aplicar para delinear la línea de costa, suele venir acompañado de incertidumbres asociadas a la digitalización manual y subjetiva por parte de los investigadores. No obstante, dichos errores se pueden disminuir significativamente si se utilizan imágenes multiespectrales con buenas resoluciones espaciales, es decir, con tamaños de píxeles inferiores a los 5 metros. Por lo que incluso, es una de las metodologías que también se pueden aplicar para fotografías aéreas u otras técnicas de fotogrametría.

El desarrollo de metodologías para la extracción automática o semiautomática de la línea de costa, se debe, entre otros factores, a la baja resolución espacial de los principales datos de libre acceso, es decir, las imágenes de LANDSAT y SENTINEL-2. Por lo que, la aplicación del método manual a los productos de estos satélites, arrojaría mayor incertidumbre en la digitalización de la línea de costa y aumentaría la probabilidad de errores en los resultados. Como solución, diferentes autores han propuesto metodologías alternativas de identificación de la línea de costa, donde las herramientas de software SIG son las encargadas de extraer con mejor precisión la línea costera.

El índice de agua de diferencia normalizada o NDWI, cuenta con diferentes variaciones propuestas por investigadores, algunas, no necesariamente surgieron por el estudio de la zona costera, pero sí, con la necesidad de estudiar los cuerpos de agua superficiales con apoyo de los SIG, como es el caso del NDWI de McFeeters (1996) y el NDWI y MNDWI de Xu (2006). No obstante, estos métodos han sido adoptados por investigadores para la extracción automática de la línea costera en sus publicaciones, además, de que han requerido la complementación de técnicas de detección del valor umbral óptimo, que se presenta como el principal inconveniente en la aplicación de estas metodologías (Ghorai & Mahapatra, 2020; Kalthar & Itaya, 2020; Liu et al., 2017; Mishra et al., 2019; Salauddin et al., 2018).

Los métodos de detección del valor umbral, son indispensables para la correcta identificación de la línea costera cuando se aplican índices de agua de diferencia normalizada. La línea de costa estará representada como el límite o división entre las dos clases de la imagen binaria NDWI, usualmente, los píxeles con valores positivos corresponden al agua, mientras que los píxeles con valores negativos hacen referencia a la tierra (Liu et al., 2017). El método Otsu (1979), y el método del valor umbral dinámico, han sido utilizados por diferentes autores en sus respectivas investigaciones, obteniendo resultados con buenos rangos de precisión al extraer la línea de costa. No obstante, la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático supervisado por máquinas de soporte vectorial (SVM) en conjunto con métodos de detección del valor umbral, permiten eliminar los píxeles de cuerpos de agua que no son adyacentes al océano, logrando una mayor uniformidad en la imagen binaria NDWI, sobre todo en los píxeles cercanos al límite o separación entre la tierra y el agua, es decir, la línea de costa.

Otros índices, se han desarrollado exclusivamente para el estudio de la zona costera, diseñadas con la finalidad de reducir las incertidumbres por la digitalización manual de la línea de costa, o incluso para prescindir de la utilización de métodos de detección del valor umbral. El NDWI propuesto por Aboulela et al. (2020), incluye tres bandas multiespectrales para generar la imagen binaria, la cual, además, presenta significativas diferencias entre las dos clases, favoreciendo la extracción de la línea de costa sin necesidad de calcular el valor umbral óptimo. Aunque, para reducir la incertidumbre por la posible mala interpretación de la herramienta de software, yo particularmente recomiendo el cálculo del valor umbral óptimo, aplicando cualquiera de los métodos anteriormente mencionados.

Recientemente, Ghorai & Mahapatra (2020) propusieron el índice de Agua Costera o CWI, una variante significativa de los NDWI tradicionales, sin embargo, la particularidad de éste índice, más allá de las bandas multiespectrales que incluye en su aplicación, yace, en los procedimientos consecutivos que se deben aplicar a la imagen binaria resultante, tales como el filtro de matriz de convolución 3x3, que realza los píxeles de agua más que los píxeles de tierra; el método de Otsu, para determinar el valor umbral óptimo; y luego, la implementación de los filtros morfológicos binarios de apertura y cierre, que eliminan el ruido de la imagen, rellenan los huecos y ajustan la estructura de la imagen binaria. No obstante, éste interesante índice deberá probarse en otros productos de imágenes multiespectrales diferentes a LANDSAT 7 (ETM+) y 8 (OLI), para poder conocer el alcance de su efectividad.

Una de las formas más comunes de verificar el resultado de la línea de costa extraída, se consigue contrastando con datos de campo, como, por ejemplo, levantando puntos con GPS sobre lo que se evidencia como la línea de costa en el área de estudio, y a partir de esta información se puede ajustar la línea de costa extraída (Selvan et al., 2020).

Otra alternativa, para ajustar la posición de la línea de costa fue propuesta por El-Ashmawy (2019), pero requiere, aparte de las imágenes multiespectrales, registros de estaciones con mareógrafo cercanas al área de estudio, de tal manera que se pueda calcular el nivel de agua más alto promedio o MHHWL, y además, se necesitará un modelo digital de terreno (DTM) con muy buena resolución. La metodología desarrollada por El-Ashmawy (2019), permite calibrar la línea de costa extraída en la posición del nivel de agua más alto promedio, favoreciendo que exista coherencia en los resultados para posteriores análisis, como, por ejemplo, en la evaluación multitemporal del litoral.

5.4 Análisis comparativo de metodologías de evaluación multitemporal de la línea de costa utilizando SIG

La evaluación multitemporal de la línea de costa, se ha abordado de forma tradicional, como, la medición de los cambios espaciales en la posición de dos líneas de costas de distintas fechas (Ojeda-Zújar, 2000). Las diferentes formas de medir dichas variaciones espacio-temporales de la línea costera, han dado origen a las distintas metodologías para evaluar los cambios del litoral.

A partir de las publicaciones consultadas en esta investigación, se seleccionaron cuatro metodologías para la evaluación multitemporal de la línea de costa. Dos de las metodologías, han sido aplicadas ampliamente en distintas investigaciones, tales como, el método de medición manual y la utilización de la herramienta de software DSAS, mientras que las otras dos metodologías, se han escogido como ejemplo de la integración de modelos matemáticos y físicos, que puedan simular el comportamiento e influencia de factores naturales o antrópicos en las variaciones de posición de la línea costera. En la *Tabla 4* se resumen las ventajas y desventajas de las metodologías mencionadas, la cual está basada en el cuadro del *Anexo 3*.

Tabla 4. Metodologías de evaluación multitemporal de línea de costa.

Metodologías	Ventajas	Desventajas
Medición Manual	Reduce los tiempos en la medición de las variaciones que sufre la línea de costa.	Se deben considerar incertidumbres asociadas a las mediciones manuales de cambios de la línea de costa.
Aplicación de herramienta de Software DSAS	La herramienta de software DSAS se puede adquirir de forma gratuita. Posee diferentes parámetros estadísticos para calcular las variaciones de la línea de costa y las tasas de erosión. La herramienta DSAS permite estimar los cambios que puede sufrir la línea de costa a futuro.	Sólo se puede añadir como extensión del software ArcGIS desktop 10x.
Aplicación de un modelo de sedimentación acoplado a un modelo hidrodinámico	El modelo puede ser utilizado para estimar las variaciones de la línea de costa a futuro.	Los modelos de sedimentación y el modelo hidrodinámico aún se encuentran sujetos a prueba por parte de los autores.
Técnicas de regresión lineal y enfoque de simulación	Las técnicas de regresión lineal, se pueden utilizar para estimar los cambios de la línea de costa a futuro. La metodología incluye métodos estadísticos para el cálculo de errores de pronóstico.	Requiere que el investigador tenga conocimientos de programación para facilitar la adaptación del código a las necesidades de la investigación.

El *método manual*, como se le ha nombrado en esta monografía, no hace referencia a la exclusión del uso de aplicativos de software SIG para calcular las variaciones de la línea de costa, por el contrario, se refiere a metodologías donde el investigador utiliza herramientas de geoprocetamiento, incluidas en softwares de SIG, y las aplica teniendo en cuenta un orden metodológico para medir los cambios que sufre la línea costera. No obstante, se considera adecuado incluir en la metodología, el análisis estadístico de los resultados y el cálculo de incertidumbres.

Cuando se mencionan estudios de evaluación multitemporal de la línea de costa utilizando Sistemas de Información Geográfica, existe un aplicativo de software ampliamente utilizado y documentado en diferentes publicaciones científicas, la herramienta de software Digital Shoreline Analysis System, mejor conocida como DSAS, la cual, fue desarrollada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos o *USGS*, por sus siglas en inglés, y funciona como una extensión dentro del software ArcGIS 10x, de versión de escritorio.

La herramienta DSAS es destacada por los investigadores que la han utilizado, gracias a la sencilla interfaz que posee, el manejo práctico de su operación, y la variedad de métodos estadísticos para cuantificar los cambios de la línea de costa (Valderrama-Landeros et al., 2020). Dentro de las operaciones estadísticas que incluye la herramienta DSAS, las más utilizadas son:

- ❖ El movimiento neto de la línea de costa (NSM).
- ❖ La tasa de punto final (EPR).
- ❖ La tasa de regresión lineal (LRR), y
- ❖ La Regresión lineal ponderada (WLR).

Sin embargo, cada investigador está en la obligación de comprobar el método estadístico que se adapte mejor a las necesidades de su investigación, como por ejemplo, para estudios de variación de línea de costa en cortos periodos de tiempo, alrededor de los cinco años, Mishra et al. (2019) sugiere utilizar el método de tasa de punto final (EPR); mientras que en periodos a largo plazo, mayores a 20 años, recomienda utilizar métodos como la tasa de regresión lineal (LRR) y la regresión lineal ponderada (WLR).

Gracias a los avances tecnológicos y de investigación, cada vez estamos más cerca de poder simular detalladamente el comportamiento de un ecosistema costero, y dentro de este engranaje de dinámicas y procesos, tanto naturales como antrópicos, lograr evaluar, por ejemplo, las variaciones de la línea de costa a través del tiempo. Seghir et al. (2018), a través del desarrollo de un código en Fortran, lenguaje de programación orientado al cálculo numérico y la computación científica, lograron acoplar un modelo de sedimentación junto con un modelo hidrodinámico, basado en el método Lattice Boltzmann. Los resultados arrojados por la simulación de los modelos, les permitió a los investigadores estimar los cambios que puede sufrir la línea de costa. Sin embargo, es importante aclarar que dichos modelos aún se encuentran sujeto a pruebas por parte de los autores, además, de que su intención a futuro es poder simular una costa virtual sujeta a diversos procesos marinos, incluyendo por ejemplo, la influencia del viento (Seghir et al., 2018).

Por su parte, Aboulela et al. (2020), aplicaron cuatro técnicas de regresión lineal para predecir la tendencia de cambio que sufre la línea de costa en el área de estudio. En los resultados particulares de su investigación, el *modelo de regresión inverso* y el *modelo de regresión logarítmico*, representaron la mejor tendencia de cambios en la línea de costa, al arrojar los menores valores de *desviación absoluta media (MAD)* y de *error medio cuadrático (MSE)*, finalmente, las ecuaciones proporcionadas por el analizador de entrada, sobre las tendencias representadas por ambos modelos, fueron utilizadas para predecir las variaciones futuras en la zona costera de estudio. Una de las mayores ventajas de la utilización de las técnicas de regresión, es que pueden ajustarse y combinarse con algoritmos de aprendizaje automático, para obtener resultados mucho más precisos sobre las variaciones que puede sufrir la línea de costa en el futuro.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente monografía de investigación, pretendió comparar las principales metodologías que utilizan los sistemas de información geográfica (SIG), para la evaluación multitemporal de la línea de costa. Sin embargo, debido a las diversas fuentes de información proveniente de diferentes sensores pasivos y activos, que han registrado y/o siguen registrando información sobre la superficie de la tierra, sólo se tuvieron en cuenta para el análisis comparativo, las metodologías que utilizan imágenes multiespectrales provenientes de sensores remotos pasivos. A continuación, se describen las conclusiones y recomendaciones generadas a partir del presente estudio:

- ❖ Se identificaron ocho (8) metodologías para la extracción de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales, dentro de las cuales, se hace mención del *método manual* y una variedad de metodologías compuestas por la aplicación de índices de agua de diferencia normalizada o NDWI en conjunto con algunos métodos para hallar el valor umbral óptimo.
- ❖ Cuatro (4) metodologías que aplican SIG para la evaluación multitemporal de la línea de costa fueron identificadas a través de la consulta de la presente investigación. El método de *Medición Manual* y la aplicación de la herramienta de software *DSAS*, corresponden a las metodologías de mayor utilización para la evaluación multitemporal de la línea de costa con base en las publicaciones consultadas. No obstante, se decidió incluir una metodología que empleó *modelos hidrodinámicos y de sedimentación*, y otra metodología que aplicó *técnicas de regresión lineal con enfoque de simulación*, con la intención de destacar diferentes orientaciones metodológicas que aprovechan los recursos ofrecidos por los SIG, para desarrollar nuevos avances investigativos en la estimación a futuro de las variaciones de la línea de costa.
- ❖ Se describieron los procedimientos de ocho (8) metodologías de extracción de la línea de costa y se realizó la comparación de las ventajas y desventajas asociadas a cada una de ellas. Para todas las metodologías mencionadas, se recomienda contrastar los resultados con levantamientos de información en campo, a través de la toma de puntos con GPS o complementar con datos de estaciones de mareógrafos, información cartográfica y modelos digitales de elevación (DEM), para identificar características de la geomorfología del litoral y verificar la posición de la línea de costa extraída.

- ❖ La mayoría de los métodos de identificación o extracción de la línea de costa revisados en esta investigación, han sido aplicados en imágenes multiespectrales de acceso libre, es decir, provenientes de los satélites de la serie LANDSAT y SENTINEL-2. Las imágenes multiespectrales comerciales por tener mejores resoluciones espaciales, usualmente, se utilizan para contrastar o corroborar los resultados de investigaciones obtenidos a través de productos de acceso libre, sin embargo, cabe aclarar que los datos espaciales de satélites comerciales también se pueden utilizar como datos principales en estudios de evaluación multitemporal de la línea de costa y obtener así resultados con mayor precisión.
- ❖ Se describieron los procedimientos de cuatro (4) metodologías que utilizan SIG para la evaluación multitemporal de la línea de costa a partir de imágenes multiespectrales. Cabe destacar que estas metodologías hacen parte del *Análisis de Planta* de la variabilidad de la línea de costa, por lo que en un estudio íntegro se deberá complementar con un *Análisis de Perfil* sobre el área de estudio, para incluir características como la pendiente, los niveles de marea, entre otros.
- ❖ A partir de los cuadros descriptivos de las metodologías de evaluación multitemporal de la línea de costa, se establecieron las ventajas y desventajas de cada una de los métodos seleccionados. La herramienta de software DSAS está basada en el método de *medición manual*, sin embargo, realiza los procesos de manera más ágil permitiendo así ahorrar tiempos en la investigación, además, de que ofrece una variedad de técnicas estadísticas para determinar las variaciones de la línea de costa durante el rango de tiempo de estudio.
- ❖ Las otras dos metodologías de evaluación multitemporal de línea de costa incluidas en esta revisión fueron la aplicación de *un modelo de sedimentación acoplado a un modelo hidrodinámico* y las *técnicas de regresión lineal con enfoque de simulación*, las cuales se muestran como interesantes métodos basados en modelos matemáticos y físicos con los que se pretende simular la influencia de factores naturales que ejercen presiones sobre un área litoral, además de permitir proyectar a futuro las variaciones en la posición que puede tener una la línea de costa. Sin embargo, ambas metodologías deben ser alimentadas con diferentes registros de líneas de costa para distintos periodos de tiempo, con la finalidad de que la determinación de sus tendencias y estimaciones arrojen resultados con menor incertidumbre.
- ❖ Se describieron características relevantes de diferentes sensores pasivos con escáner de imagen multiespectral, un total de doce (12) series de satélites que fueron clasificados en dos grupos teniendo en cuenta su resolución espectral: Satélites con menos y más de cinco (5) bandas. Dentro de los grupos de satélites, además de incluir sensores remotos referenciados en publicaciones consultadas, se incluyeron otros que

por las características de sus resoluciones se consideran potenciales fuentes de información espacial para el desarrollo de estudios de variabilidad de la línea de costa.

- ❖ Las imágenes multiespectrales pueden utilizarse para desarrollar estudios de evaluación multitemporal de línea de costa, ya que representan una importante fuente de datos espaciales con alternativas de adquisición de datos de distintos satélites: algunos, con amplios periodos de registros de información histórica; otros, con muy buenas resoluciones espaciales por tener pixeles con tamaños menores a un metro; además, de que varios satélites en órbita permiten planificar la captura de las imágenes en las fechas más convenientes; o incluso, existen satélites que brindan sus productos con acceso libre.
- ❖ Cuando se trabaja con imágenes multiespectrales con baja resolución espacial, se pueden utilizar técnicas de mejora de la calidad de la imagen, como *el filtro Laplaciano*, la técnica de *estiramiento mínimo-máximo*, la técnica de *estiramiento de histograma* o la técnica de *detección de bordes*, para generar efectos de suavizado o contrastes en la imagen y facilitar su análisis. También, se pueden utilizar técnicas de mejora de la resolución espacial, como, el *Pansharpening*, o incluso llegar a aplicar *Algoritmos de Nitidez* a la banda pancromática, para reducir mucho más el tamaño de los pixeles y obtener una imagen compuesta con mejor resolución espacial.
- ❖ Se logró presentar un balance interesante de metodologías y tendencias de investigación utilizando Sistemas de Información Geográfica para estudios de evaluación multitemporal de la línea de costa. Sin embargo, nuevos métodos o adaptaciones de metodologías surgirán de la mano con el constante desarrollo tecnológico en que vivimos, por lo que, será entonces, nuestro deber, mantenernos informados sobre las nuevas tendencias y aprovechar las ventajas que nos ofrecen los SIG para el estudio de la zona costera.

7. REFERENCIAS

- Aboulela, H. A., Bantan, R. A., & Zeineldin, R. A. (2020). Evaluating and Predicting Changes Occurring on the Coastlines of Jeddah City Using Satellite Images. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(45), 327–339. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13369-019-04085-1>
- Boateng, I. (2012). An application of GIS and coastal geomorphology for large scale assessment of coastal erosion and management: A case study of Ghana. *Journal of Coastal Conservation*, 16(3), 383–397. <https://doi.org/10.1007/s11852-012-0209-0>
- Casal, G., Sánchez-Carnero, N., & Freire, J. (2010). Generación de una línea de costa digital de Galicia (NW España) a gran escala, utilizando fotointerpretación y segmentación dinámica. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 53, 7–19. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3321000>
- Chuvieco, E. (2008). *Teledeteccion ambiental* (3a ed. rev; E. Chuvieco, ed.). Barcelona: Editorial Ariel, S. A.
- El-Ashmawy, N. (2019). Automatic determination of shoreline at maximum retreating. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(3), 247–252. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.07.001>
- Ghorai, D., & Mahapatra, M. (2020). Correction to: Extracting Shoreline from Satellite Imagery for GIS Analysis. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s41976-020-00031-0>
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5 . 0 User Guide* (p. 110). p. 110. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/ofr20181179>
- INVEMAR, I. de I. M. y C. J. B. V. de A. (2017). *Documento técnico de investigación : Análisis de vulnerabilidad marino costera e insular ante el cambio climático para Colombia como insumo para la tercera comunicación nacional de cambio climático*. Santa Marta - Magdalena.
- Kalther, J., & Itaya, A. (2020). Coastline changes and their effects on land use and cover in Subang , Indonesia. *Journal of Coastal Conservation*, 2017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11852-020-00736-w>
- Liu, Y., Wang, X., Ling, F., Xu, S., & Wang, C. (2017). Analysis of coastline extraction from Landsat-8 OLI imagery. *Water (Switzerland)*, 9(11), 1–26. <https://doi.org/10.3390/w9110816>
- Mahapatra, M., Ramakrishnan, R., & Rajawat, A. S. (2015). Coastal vulnerability assessment of Gujarat coast to sea level rise using GIS techniques : a preliminary study Coastal vulnerability assessment of Gujarat coast to sea level rise using GIS techniques : a preliminary study. *Coastal Conservation*, 19, 241–256. <https://doi.org/10.1007/sl>

- Marcou, O., Chopard, B., El Yacoubi, S., Hamroun, B., Lefèvre, L., & Mendes, E. (2013). A Lattice Boltzmann model to study sedimentation phenomena in irrigation canals. *Communications in Computational Physics*, 13(3), 880–899. <https://doi.org/10.4208/cicp.371011.260112s>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mishra, M., Chand, P., Pattnaik, N., Kattel, D. B., Panda, G. K., Mohanti, M., ... Mohanty, T. (2019). Response of long- to short-term changes of the Puri coastline of Odisha (India) to natural and anthropogenic factors: a remote sensing and statistical assessment. *Environmental Earth Sciences*, 78(11). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8336-7>
- Niño, D., & Oviedo, F. (2018). Determinación de la variación morfológica costera de la Bahía de Tumaco, a partir de análisis multitemporal con sensores remotos. *Boletín Científico CIOH*, 36(36), 71–86. <https://doi.org/10.26640/22159045.439>
- Ojeda-Zújar, J. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de La A.G.E.N.*, 30, 103–118.
- Ortiz-Malavasi, E. (2008). Cambios geoformológicos en el litoral Caribe y Pacífico de Costa Rica. Caso del Complejo Déltico de Sierpe. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5(15), 45–54. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5123296.pdf>
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Pais-Barbosa, J., Veloso-Gomes, F., & Taveira-Pinto, F. (2016). Coastal features analysis using GIS tools — stretch Esmoriz-Furadouro Linked references are available on JSTOR for this article : Coastal features analysis using GIS tools-stretch. *Coastal Conservation*, 16(3), 269–279. <https://doi.org/DOT 10.1007/sl 1852-011-0174-z>
- Parece, T. E., & Campbell, J. B. (2015). Advances in Watershed Science and Assessment. In T. Younos & T. E. Parece (Eds.), *Advances in Watershed Science* (33rd ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14212-8>
- Rangel-Buitrago, N. G., & Posada-Posada, B. O. (2013). Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio. *Revista Intropica*, 8, 29–42. Retrieved from <https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/intropica/article/view/730>
- Rondón-Ramírez, G. (2011). Análisis de la variación temporal de la línea de costa y caracterización de la geomorfología litoral: bahía de Paíta, Perú 1946-2007. *Espacio y Desarrollo*, 114(23), 93–114. Retrieved from <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/3501>
- Rondón-Ramírez, G., & Tavares-Correa, C. (2018). Adaptación de un índice de vulnerabilidad costera - IVC para el litoral peruano: un estudio de caso. *Espacio y Desarrollo*, 57(31), 33–57. <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201801.002>

- Safaval, A. P., Zarkesh, K. M., Neshaei, S. A., & Ejlali, F. (2018). Study of morphological changes and sustainable development on the southern coasts of the Caspian Sea using remote sensing and GIS. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, *16*(3), 271–285.
- Salauddin, M., Hossain, K., Tanim, I., Kabir, M., & Saddam, M. (2018). Modeling spatio-temporal shoreline shifting of a coastal island in Bangladesh using geospatial techniques and DSAS extension. *Annals of Valahia University of Targoviste- Geographical Series*, *18*, 1–13. <https://doi.org/10.2478/avutgs-2018-0001>
- Samanta, S., & Paul, S. K. (2016). Geospatial analysis of shoreline and land use / land cover changes through remote sensing and GIS techniques. *Modeling Earth System Environmental*, *2*, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0180-0>
- Seghir, A., Marcou, O., & El Yacoubi, S. (2018). Shoreline evolution: GIS, remote sensing and cellular automata modelling. *Natural Computing*, *17*(3), 569–583. <https://doi.org/10.1007/s11047-017-9638-x>
- Selvan, S. C., Kankara, R. S., Prabhu, K., & Rajan, B. (2020). Shoreline change along Kerala, south-west coast of India, using geo-spatial techniques and field measurement. *Natural Hazards*, *100*(1), 17–38. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03790-2>
- Sherein, E.-S., Abbas, M., Tarek, A., & Safaa, G. (2020). Vulnerability assessment of African coasts to sea level rise using GIS and remote sensing. *Environment, Development and Sustainability*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00639-8>
- Tavares, A., & Drenkhan, F. (2010). Variación de la línea de litoral entre puerto Chicama y Puémape, La Libertad, Perú (1961-2006). *Espacio y Desarrollo*, *117*(22), 103–117.
- Valderrama-Landeros, L., Blanco y Correa, M., Flores-Verdugo, F., Álvarez-Sánchez, L. F., & Flores-de-Santiago, F. (2020). Spatiotemporal shoreline dynamics of Marismas Nacionales, Pacific coast of Mexico, based on a remote sensing and GIS mapping approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8094-8>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, *27*(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zhang, K., Douglas, B. C., & Leatherman, S. P. (2004). Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, *64*(1–2), 41–58. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000024690.32682.48>
- Zhu, C., & Zhang, X. (2017). Coastal Remote Sensing. In X. Zhang (Ed.), *Modeling with Digital Ocean and Digital Coast* (Coastal Re, pp. 169–203). https://doi.org/10.1007/978-3-319-42710-2_8

ANEXOS

ANEXO 1. COMPARACIÓN DE SENSORES PASIVOS DE ESCÁNER DE IMAGEN MULTIESPECTRAL.xlsx

ANEXO 2. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE IDENTIFICACIÓN O EXTRACCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA A PARTIR DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES.xlsx

ANEXO 3. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DE LA LÍNEA DE COSTA A PARTIR DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES.xlsx