



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS
Unidad Multidisciplinaria de Docencia e
Investigación Sisal

Variaciones de la línea de costa debido a la marea
y la obtención de modelos digitales de elevación

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN MANEJO SUSTENTABLE DE
ZONAS COSTERAS

P R E S E N T A:

ASHLEY DAVID GRACIA BARRERA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ERNESTO TONATIUH MENDOZA PONCE



SISAL YUCATÁN, MÉXICO,
2016





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Datos del alumno

Ashley David Gracia Barrera Tel. 9671143723

davesoun@hotmail.com

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias,

Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Sisal

Manejo Sustentable de Zonas Costeras

308019315

Datos del tutor	Dr. Ernesto Tonatiuh Mendoza Ponce	Universidad Nacional Autónoma De México
Datos del sinodal 1	Dra. Elena Ojeda Casillas	Universidad Nacional Autónoma De México
Datos del sinodal 2	Dra. Cecilia Enríquez Ortiz	Universidad Nacional Autónoma De México
Datos del sinodal 3	Dr. Rodolfo Rioja Nieto	Universidad Nacional Autónoma De México
Datos del sinodal 4	Dr. Alec Torres Freyermuth	Universidad Nacional Autónoma De México
Datos del trabajo escrito	Variaciones de la línea de costa debido a la marea y la obtención de modelos digitales de elevación 125 p., 2016	

Dedicatoria

A mi mamá

*Rosa María Barrera Gutiérrez,
por el gran trabajo y esfuerzo que siempre has dado
por buscar siempre lo mejor para mí
y por haberme enseñado el amor al mar y a la vida.*

A mi Abue

*María Concepción Gutiérrez Ruiz
gracias por cuidarme, acompañarme en mi andar
y mostrarme siempre el camino correcto,*

A mis primos

que sobre todo son mis hermanos

Y a mis tíos

que siempre me han apoyado e incentivado a seguir adelante.

*A ustedes les debo todo lo que soy,
gracias por el amor que siempre me han dado.
Con cariño les dedico este trabajo.*



El caminante sobre mar de nubes (1818)
Caspar David Friedrich

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los proyectos: PAPIIT IA100113 DGAPA UNAM titulado Variaciones de la línea de costa de la playa de sisal (Yucatán) debido a eventos naturales; y al proyecto interno del Instituto de Ingeniería 5341 “Implementación de estación de video monitorización para la obtención de indicadores de vulnerabilidad a la erosión”.

Este trabajo de tesis de licenciatura no hubiera podido llegar a puerto sin el apoyo de muchas personas a las que deseo agradecer.

Al Dr. Tonatiuh Mendoza Ponce por su infinito apoyo y paciencia al dirigir mi trabajo de tesis, y por motivarme a siempre seguir mejorando.

A la Dra Elena Ojeda por compartirme su amplio conocimiento en el tema y brindarme, siempre con buen gesto, las observaciones y recomendaciones que me han permitido desarrollar este trabajo.

A mi comité de evaluación: la Dra Cecilia Enríquez, el Dr Alec Torres Freyermuth, y el Dr Rodolfo Rioja Nieto; por dedicar tiempo y esfuerzo a revisar este escrito y darme sus comentarios que permitieron mejorar sustancialmente el producto final de este trabajo.

A mi familia: mi mamá, mi abue, mis primos: Eddie, Rafa, Toño, Betsy, Allis, Omar y Eli. y mis tíos: Laura, Rafa, Paty, Martin, Poli y Sonia, gracias por ser la fuerza que me motiva a alcanzar mis metas.

A todos mis profesores de la carrera de MSZC, y en especial quiero agradecer al Mtro. Héctor Cisneros, a la Dra. Maite Mascaró, y a el Dr. Gilberto Jerónimo (†), por mostrarme la pasión y la rigurosidad de la ciencia. Así también al Mtro. Eduardo Pacheco por las clases de Matlab, y a la Dra. Nidiyare Hevia, por el curso de procesamiento digital de imágenes y por prestarme literatura que me sirvió para ahondar en este campo.

A mis compañeros de la Quinta Generación de la LMSZC;
Y especialmente a Valeria, juntos hemos emprendido este maravilloso viaje que ha representado la licenciatura, gracias por estar a mi lado en este camino.

A los investigadores del LIPC, en particular a la Dra. Gabriela Medellín por facilitarme los levantamientos topográficos que fueron útiles para la validación de este trabajo, y al Dr. José López por proporcionarme los datos del mareógrafo.

A los compañeros y amigos de LIPC en especial a Mauricio, Martín, Pablín, Alejandra y Alex. Así como a Pedro y Daniel por los levantamientos topográficos que realizaron.

A mis amigos chilangos de toda la vida: Saúl, Karla, Betza, Memo, Víctor e Iván y a mi familia que encontré detrás de los cerros entre la neblina de las montañas chiapanecas.

Al bello puerto de Sisal y su gente en especial a la familia de Doña Gaby que siempre me trataron como un miembro de su familia.

A Gato y a mi manada: Nubi, Camu, Cafecita y Lobo; que me adoptaron y que perdí en este proceso

Oceanografía

Vuelvo la espalda al mar que ya entiendo
A mi humanidad me devuelvo
Y cuanto hay en el mar yo me sorprendo
En la pequeñez que soy y reconozco.

De naufragios sé más que sabe el mar,
De abismos que sondeo, vuelvo exangüe,
Y para que nada de mí lo separe,
Anda un cuerpo ahogado en mi sangre.

José Saramago

Canto arena

...he puesto filo al anhelante corazón
arrojo estrellas a mecharse contra vientos
el sueño ha desencadenado la canción
y la canción de hoy me sabe a juramento.
La prisa lleva maravilla y lleva error
pero viajamos sobre rueda encabritada
he despertado en el ojo del ciclón
cuento millones de agujeros en el alma.

Por eso canto arena
roca que luego es multitud del agua buena
Y canto espuma
cresta que cuando logra ser ya no es ninguna.

Silvio Rodríguez

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
<i>Antecedentes</i>	7
MARCO TEÓRICO	13
2.1 <i>Morfodinámica de la playa</i>	13
2.1.1 Línea de costa.....	14
2.1.2 Cara de la playa.....	15
2.1.3 Set-up.....	17
2.2 <i>Video Monitoreo</i>	18
2.2.1 Sistema Remoto de Monitorización de Playas SIRENA.....	21
2.2.2 Calibración de las imágenes.....	22
2.3 <i>Procesamiento digital de imágenes</i>	25
2.3.1 Espacio de color RGB y HSV.....	25
2.3.2 Algoritmos de detección de bordes.....	27
2.3.2 Obtención de umbrales.....	28
JUSTIFICACIÓN	30
OBJETIVOS	32
ÁREA DE ESTUDIO	33
METODOLOGÍA	35
6.1 <i>Obtención de imágenes</i>	36
6.2 <i>Calibración de imágenes</i>	38
6.3 <i>Detección de línea de costa</i>	39
6.3.1 Extracción de ROI.....	39
6.3.2 Transformar RGB a HSV.....	40
6.3.3 Filtrado y re escalado de las matrices.....	40
6.3.4 Obtención de umbrales y binarización de matrices.....	40
6.3.5 Obtención matriz borde.....	43
6.3.6 Extracción de línea de costa.....	44
6.3.7 Selección de la línea de costa.....	45
6.4 <i>Obtención de alturas</i>	45
6.5 <i>Rectificación línea de costa</i>	46
6.6 <i>Generación de modelos de elevación</i>	47
6.7 <i>Validación</i>	47
6.7.1 Selección de días.....	47
6.7.2 Evaluación de detección de línea de costa.....	48
6.7.3 Evaluación de la posición de la línea de costa.....	48
6.7.4 Evaluación del modelo de elevación.....	49
RESULTADOS	50
7.1 <i>Calibración de imágenes</i>	50
7.1.1 Calibración intrínseca.....	50
7.1.2 Extrínseca.....	51
7.1.3 Rectificación a vistas en planta.....	54

7.2 Detección de línea de costa	55
7.2.1 Extracción de ROI.....	55
7.2.2 Transformación de RGB a HSV	57
7.2.3 Filtrado y re- escalado.....	57
7.2.4 Obtención de umbrales.....	59
7.2.5 Matrices de bordes	62
7.2.6 Extracción de línea de costa.....	63
7.3 Selección de la línea de costa	65
7.4 Validación	68
7.4.1 Selección de días.....	68
7.4.2 Evaluación de detección de líneas de costa.....	69
7.4.3 Obtención de altura.....	80
7.4.4 Validación LCE rectificada.....	83
7.4.5 Modelo de elevación y pendiente de la playa	87
DISCUSIÓN.....	93
CONCLUSIONES.....	102
BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXOS	111
<i>Anexo 1. Función Mlc_1 programada en Matlab®.....</i>	<i>111</i>
<i>Anexo 2. Subrutina bordes programada en Matlab®</i>	<i>115</i>
<i>Anexo 3. Función lcmt programada en Matlab®.</i>	<i>116</i>

Lista de abreviaturas más utilizadas

ANN Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Network)

CCD Color Channel Divergence

CSI Indicadores del Estado de la Costa (Coastal State Indicator)

ECM Error cuadrático medio

GPS Sistemas de posicionamiento global

HSV Espacio de color Matiz Saturación y Valor de brillo (Hue Saturation and Value)

LCd Línea de costa digitalizada manualmente

LCE Línea de costa elegida

LIDAR Detección por luz y distancia (Light Detection and Ranging)

LoG Laplaciano de Gaussiano

MDE Modelo Digital de Elevación

NMM Nivel Medio del Mar

PIC Pixel Intensity Cluster

RGB Espacio de color Rojo Verde y Azul (Red Green and Blue)

ROI Región de interés (Region of Interest)

SLIM Shore Line Intensity Maximum

SWLS Línea de costa del nivel de agua en calma (Still Water Level Shoreline)

UTC Tiempo Universal Coordinado (Coordinated Universal Time)

ZOFEMAT Zona Federal Marítima Terrestre

RESUMEN

Las playas actúan como un disipador natural de la energía del oleaje, esto provoca que sean sensibles a cambios en distintas escalas de tiempo. Es debido a esto que el monitoreo constante de la morfología costera es una tarea primordial para el manejo e ingeniería costera. Los sistemas de video monitoreo han permitido obtener información sobre el comportamiento de la costa cercana a una gran resolución temporal por un bajo costo. Uno de los elementos más importantes que pueden obtenerse de las imágenes de video es el estado de la línea de costa. En este trabajo se evalúa un método para obtener modelos digitales de elevación de la cara de la playa a partir de la extracción de la línea de costa utilizando imágenes de video asociadas al nivel del mar a diferentes horas. La extracción de líneas de costa requiere de dos pasos; una primera parte automatizada genera 5 posibles líneas de costa, tres líneas se obtienen clasificando la imagen usando la información del matiz, saturación y brillo y las otras dos líneas se obtienen mediante la detección de bordes con la información de brillo. El segundo paso consiste en una selección por el usuario en el cual se determina la línea que mejor se ajusta a lo que se considera la línea de costa. Para obtener el modelo de elevación, se utilizan las líneas de costa en diferentes espacios de tiempo y se asignan los valores de nivel del mar correspondiente. La obtención de la línea de costa fue validada comparándola con detecciones manuales sobre las imágenes y la selección y el modelo de elevación fueron comparados con datos obtenidos mediante GPS. Al hacer una evaluación entre el modelo digital obtenido y un levantamiento topográfico, se observó una buena relación. Las líneas de costa y los modelos de elevación presentados son una alternativa en el monitoreo costero, que permiten llenar los vacíos espaciales y temporales de información, dejados por otro tipo de técnicas, ayudando a aumentar nuestro conocimiento acerca de los procesos costeros y a mejorar la gestión de la zonas costeras.

INTRODUCCIÓN

La zona costera es el espacio de encuentro entre tres grandes sistemas: el océano, la atmosfera y la tierra. Estos sistemas interactúan entre sí manteniendo un intercambio dinámico de energía y materia lo cual provoca que la zonas costeras sean ambientes en constante cambio (Moreno-Casasola, 2006). Adicionalmente, las costas forman parte integral del sistema mundial que sustenta la vida y son un valioso recurso el cual se debe cuidar para avanzar hacia un desarrollo sustentable (CNUMAD, 1992) ya que en ellas se desarrollan múltiples actividades como la pesca, la maricultura, el turismo, el aprovechamiento energético, el transporte portuario entre otras. Los ecosistemas costeros proveen a la sociedad de diversos servicios ambientales, por ejemplo: los humedales costeros sirven de refugio y sitio de alimentación para muchas especies de crustáceos, peces y moluscos, así como sitio de anidación para aves migratorias; los manglares actúan como grandes sumideros de carbono (Lara-Lara et al., 2008); las playas protegen tierra adentro del impacto de la olas en las tormentas y son importantes sitios de recreación (Jiménez et al., 2011).

En este sentido, México cuenta aproximadamente con 11,122 km de litoral (INEGI, 2000) y tomando en cuenta solamente los municipios que presentan salida directa al mar, en el 2005 la costa mexicana era habitada aproximadamente por un 15% de la población del país (Azuz-Adeth y Rivera-Arriaga, 2009). Esto es menos que el porcentaje estimado para Estados Unidos donde se calcula que 40% de su población vive en condados aledaños a la costa (Ache et al., 2013). Desde una perspectiva global estimaciones para el 2010 calculan que el 10% de la población mundial vive en zonas colindantes a la costa con una elevación menor a 10 m sobre el nivel del mar, mientras que en México sólo el 5% de la población vive en esa zona, sin embargo, se espera un crecimiento poblacional para esa área del rango del 30% (Silva et al., 2014). Además los municipios costeros de México presentan las mayores tasas de crecimiento poblacional, esto debido al acelerado desarrollo económico impulsado en las localidades costeras que trae consigo conflictos por el uso de espacio y recursos (Lara-Lara et al., 2008).

Las playas representan un 40% de las costas del mundo (Bird, 2008). Están formadas por sedimento no consolidado el cual se erosiona, moviliza y deposita por la acción del oleaje, los vientos, la marea y las corrientes marinas. Se presentan en costas cuyos procesos dominantes están relacionados al oleaje. (Azuz Adeath, 2004; Moreno-Casasola, 2006). Los cambios morfológicos naturales que se presentan en la playa son resultado de la integración de diversos agentes forzantes que actúan a diferentes escalas espaciales y temporales (Sánchez-Arcilla y Jiménez, 1994). A su vez, sus características, entre las que destacan: la composición de sus sedimentos, su pendiente, orientación, y nivel de protección natural y artificial, entre otras; determinan la velocidad y grado de cambio que pueden presentar (Azuz Adeath, 2004); Por lo que considerar las distintas escalas es importante para entender bien el tipo de cambio que se está observando. La tabla 1 presenta una descripción de los tipos de cambio en función de la escala temporal y los agentes forzantes como lo describen Sánchez-Arcilla y Jiménez (1994).

En México las playas son consideradas bienes nacionales de uso común para la nación, lo cual está establecido en la Ley General De Bienes Nacionales que define a las playas como: “las partes de tierra que por virtud de la marea cubre y descubre el agua, desde los límites de mayor reflujó hasta los límites de mayor flujo anuales”. Por otra parte, el Reglamento para el uso y aprovechamiento del mar territorial, vías navegables, playas, zona federal marítimo terrestre y terrenos ganados al mar determina que la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT) corresponde a una franja de veinte metros firme, transitable y contigua a la playa. Esta debe de delimitarse considerando la cota de pleamar máxima observada durante treinta días consecutivos en una época del año en que no se presenten huracanes, ciclones o vientos de gran intensidad y sea técnicamente propicia para realizar los trabajos de delimitación (figura 1).

Tabla 1. Descripción de los cambios de la costa en función de su escala temporal basado en Sánchez-Arcilla y Jiménez (1994)

Escala temporal	Tipo de cambio	Agentes forzantes
Largo plazo (Décadas)	Cambios que experimenta la costa de manera global que determinan el balance total de sedimentos	El aporte de sedimentos de los ríos. Variaciones relativas en el nivel de mar. Intercambio de sedimentos del perfil activo a partes más internas de la plataforma por oleaje y corrientes. Intercambio de sedimentos en la playa emergida por rebase y viento.
Mediano plazo (años)	Cambios sistemáticos que pueden considerarse tendencia evolutiva de un tramo costero	El oleaje, por su capacidad de generar transporte longitudinal y sus variaciones a lo largo de la costa.
Corto plazo (horas y días)	Cambios experimentados en la zona de surf y swash que se manifiesta en movimientos de la línea de costa y modificaciones del sistema de barras	Oleaje y viento, sobre todo su alternancia entre periodos de baja energía y tormentas.
Episódico (Aleatorios)	Cambios provocados por agentes altamente energéticos de periodo de retorno largo que provocan una transformación como la erosión.	Altos niveles de mar inducidos por mareas meteorológicas juntos con temporales de oleaje.

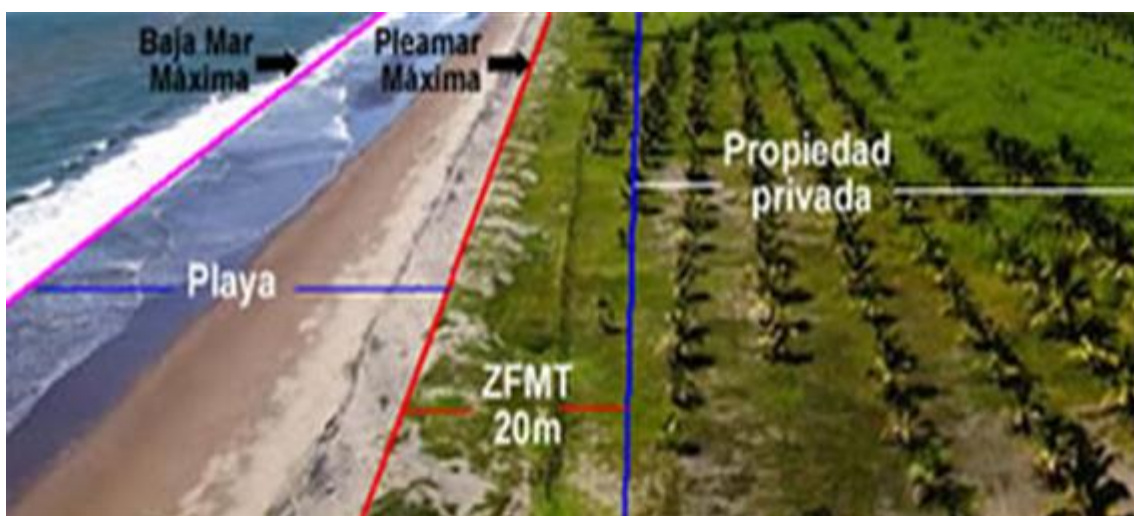


Figura 1. Descripción grafica de la playa y la ZOFEMAT. Fuente PROFEPA (2014).

En términos generales las playas cumplen tres funciones principales para la sociedad: protección, al absorber y disipar la energía del oleaje; recreación, al ofrecen un ambiente adecuado para el ocio; y de soporte a los valores naturales, sirviendo de sustrato para el desarrollo de los ecosistemas costeros. Estas funciones se presentan conjuntamente, sin embargo en algunos casos alguna de ellas suele dominar debido al uso y manejo que se le da a la playa (Jiménez et al., 2007).

El cumplimiento de las funciones que ejercen las playas puede verse afectado por diversas problemáticas. Por ejemplo: la falta de limpieza y servicios, así como exceder la capacidad de carga de la playa disminuye el valor de uso recreacional. Por otra parte, las edificaciones sobre la duna y playa que deforestan y fragmentan los ecosistemas; la construcción de presas, puertos, muelles, escolleras y espigones que afectan el balance de sedimentos; han provocado que gran parte de las playas presenten estados de erosión. Además, la compresión del litoral (coastal squeeze) que es provocado por la construcción de infraestructura a lo largo de la costa aunado al retroceso de la línea de costa, está ocasionando la disminución de los hábitats costeros (Silva et al., 2014). Esto representa una amenaza para el desarrollo costero, la cual se espera se vea acrecentada por el aumento en el nivel del mar (IPCC, 2014), así como el aumento de intensidad y presencia fenómenos meteorológicos extremos como los huracanes (Cuevas-Jiménez y Euán-Ávila, 2009; Silva et al. 2014).

Uno de los problemas que enfrentan los gestores costeros es la baja resolución temporal y espacial de los datos que les permitan tomar decisiones (Davidson et al., 2007). La implementación de estaciones fijas de monitoreo remoto de señales ópticas que toman mediciones de la zona cercana a la costa usando imágenes de video (Holman y Stanley, 2007; Nieto, et al. 2010) han aumentado la disponibilidad de datos tanto para estudios científicos como para el manejo costero. Estos sistemas obtienen datos en general cada hora y pueden llegar a tener series de datos a largo plazo que muestran variaciones de días, meses, y años cubriendo una área de hasta 5 km a una alta resolución (Kroon et al., 2007). Su aplicación ha

sido demostrada para el estudio de las barras de arena submareales (Alexander y Holman, 2004; Lippmann y Holman, 1989; Ribas et al, 2010), el comportamiento de las barras intermareales (Quartel et al., 2007), la observación de los cambios de la línea de costa y su tendencia (Ojeda y Guillén, 2008), los patrones de erosión de la línea de costa en respuesta a tormentas (Quartel et al., 2008), el efecto de regeneraciones artificiales en la línea de costa (Ojeda, et al., 2008), estudios de la zona intermareal (Holman et al.,1991; Plant y Holman, 1997), entre otros.

Debido a las evidentes ventajas que ofrece el video monitoreo costero para la implementación de mediciones a largo plazo, se han desarrollado múltiples sistemas (ej: Argus, KOSTA, Horus) y ya se cuenta con una amplia red de estaciones de video-monitoreo a lo largo del mundo, con series temporales de imágenes que sobrepasan los 20 años de duración. El primer sistema de video-monitoreo, Argus (Holman y Stanley, 2007), fue desarrollado a principios de los años 90. En México, la primera estación operacional es la Estación de Video-monitoreo de Sisal (Yucatán). Se trata de una estación que opera en el sistema Sirena (Nieto et al., 2010a) un software menos desarrollado que el Argus pero de código abierto y distribución libre. Este trabajo presenta y evalúa un método para extraer líneas de costa de imágenes de video obtenidas de la Estación de Video-monitoreo de Sisal; y valida la generación de modelos digitales de elevación (MDE) de la cara de la playa, asignando niveles de elevación del mar a líneas de costa extraídas durante la carrera de marea en la playa de Sisal.

Antecedentes

El monitoreo de la morfología costera tradicionalmente se ha realizado haciendo levantamientos topográficos de perfiles de la playa. El perfil de la playa es importante debido a que sobre él se produce la disipación y rotura de las olas. Cuando olas más grandes arriban a la costa el perfil responde reduciendo la pendiente y trasladando el punto de rotura fuera de la costa, lo que permite una mejor disipación del oleaje antes de que llegue a la costa. La disminución de la pendiente del perfil no es lo mismo que la erosión, la cual implica una pérdida permanente del sedimento de la costa cercana. El cambio del perfil de playa es una manera natural de aminorar el efecto de las olas, por lo que esta capacidad de la playa de ajustarse es un método efectivo de protección costera (Komar, 1998).

Uno de los métodos más sencillos para la medición de perfiles ha sido el método Emery (1961). Este método requiere de dos usuarios cada uno con una vara-regla. Para calcular la variación de la altura del perfil un observador se queda en la primera vara y va marcando la altura de la segunda vara con respecto al horizonte. Cada vara está sujeta a la otra por una cuerda de una longitud conocida, usualmente 10 metros, y cada medición se realiza a dicha distancia (figura 2).

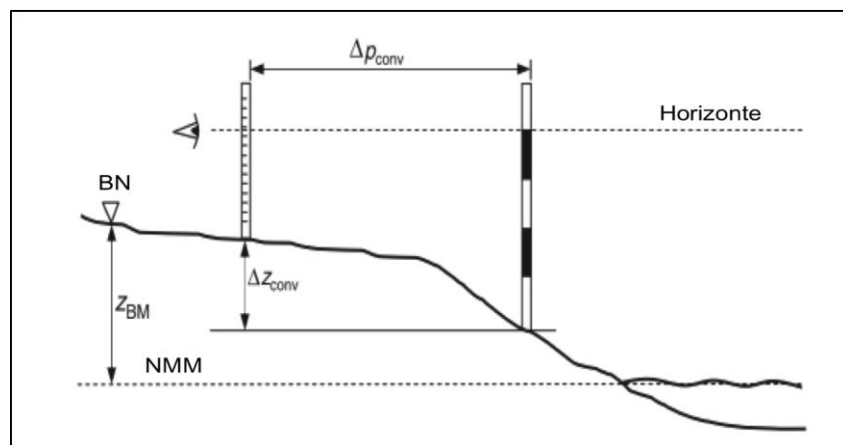


Figura 2. El método Emery calcula la diferencia de altura (ΔZ_{conv}) entre dos varas con respecto al horizonte. La distancia horizontal (Δp_{conv}) se mide con una cuerda de largo conocido o cinta métrica. La altura real puede ser conocida al comparar las mediciones con respecto a un banco de nivel (BN) (Harley, Turner, Short, y Ranasinghe, 2011).

Es necesario y deseable que las mediciones se hagan a la mayor escala temporal posible. En la playa de Collaroy- Narrabeen en Sidney Australia entre 1976 y el 2006 se levantaron cada mes 5 perfiles espaciados por 750 metros a lo largo de la costa, utilizando este método. La facilidad del método permitía que el levantamiento de los 5 perfiles se realizara en una hora. Este es uno de los factores que permitió que tal esfuerzo de monitoreo se mantuviera tanto tiempo. Uno de los problemas que presenta este método es que cada medición depende de la medición anterior, así que los errores pueden acumularse. Adicionalmente las alturas entre cada medición son interpoladas, lo que agrega incertidumbre a la medición (Harley et al., 2011). El método Emery suele adaptarse para utilizar teodolitos o estaciones totales, que mejoran la precisión de las observaciones. Con el desarrollo y apertura de la tecnología satelital y los sistemas de posicionamiento global (GPS), los métodos tradicionales de obtención de perfiles se han modificado, permitiendo que se puedan adquirir más datos en menos tiempo, con una muy alta precisión. El GPS es un sistema de posicionamiento por satélites desarrollado por el Departamento de la Defensa de los E.U., su objetivo era el de apoyar los requerimientos de navegación y posicionamiento precisos con fines militares (INEGI 2015). En la actualidad es una herramienta libre utilizada ampliamente en la navegación y posicionamientos de puntos en tierra, mar y aire.

El método de levantamiento topográfico de la morfología costera utilizando la tecnología GPS consiste en recorrer transectos predeterminados, usualmente perpendiculares a la costa, sin embargo también se realizan longitudinales dependiendo de lo que se busca medir, llevando una antena GPS móvil (llamada rover) en una estructura portátil de altura conocida. Esta estructura puede variar desde un bastón sujetado por el operador, carritos que pueden ser jalados, mochilas, donde la altura estará dada por la altura del usuario, o montados en vehículos todo terreno. Mientras se realizan las mediciones, otra antena llamada base se coloca en un punto cuyas coordenadas son conocidas. Utilizando las mediciones recolectadas por la base, los datos de la antena son corregidos,

disminuyendo los errores debido a los relojes de los satélites y del receptor, así como los provocados por la atmósfera e ionosfera. Los errores pueden corregirse en tiempo real por la antena rover si cuenta con algún tipo de comunicación con la base, o en post proceso en una computadora. A esta tecnología se le conoce como GPS diferencial (DGPS). La cual ha demostrado ser altamente eficiente para la medición de perfiles permitiendo medir alrededor de 60 puntos por segundo, con una precisión de centímetros pudiendo ser operado por una sola persona (Lee et al., 2013). Aunque las ventajas de los levantamientos con GPS son evidentes y representan la medición más exacta de la realidad, el monitoreo constante de grandes áreas que consideren las variaciones a lo largo de la costa y escalas temporales de muestreo a cortos lapsos de tiempo implican un esfuerzo de recursos tanto humanos como monetarios grandes, por lo que monitoreos a largo plazo son difíciles de mantener. Por otra parte, los grandes avances realizados en el campo de la percepción remota con la utilización de: fotografía aérea, imágenes satelitales, tecnología de detección por luz y distancia (LIDAR), radar y estaciones fijas de video monitoreo; han ampliado el panorama para nuevas formas de monitoreo.

En el caso de la interpretación de fotografía aérea, esta es una de las técnicas más utilizadas en el monitoreo de la línea de costa para conocer su posición en el pasado. El problema es que la disponibilidad de fotografías aéreas se ve muy limitada para ciertos lugares. Cuando hay, son una buena forma de obtener líneas de costa históricas, obtenidas de elementos visualmente discernibles (Boak y Turner, 2005).

Las imágenes satelitales son utilizadas para estudiar múltiples fenómenos que suceden en las zonas costeras (Richardson y LeDrew, 2006). Para el caso de la morfología costera las imágenes satélites pueden aprovecharse para obtener información de la posición de la línea de costa en áreas muy extensas. Las limitaciones que éstas presentan son principalmente la resolución espacial (tamaño de pixel) y resolución temporal, ya que la captura de imágenes se ven limitadas por la órbita del satélite, además del costo (Boak y Turner, 2005).

El LIDAR es un sensor acoplado, generalmente a un avión, que mide el tiempo que tarda en regresar un rayo láser que emite el instrumento. Transmitiendo pulsos láser repetidamente hacia la superficie se realiza un escaneo de esta. Utilizando GPS para conocer la ubicación de la aeronave, se puede determinar la localización de cada pulso laser que regresa. Con esta tecnología se cubren cientos de kilómetros de costa en poco tiempo permitiendo la generación de modelos digitales de elevación de alta resolución. La utilización de LIDAR es ideal para obtener la morfología en 3-D de la playa, pero es impráctico por su costo el cual limita la frecuencia de levantamientos (Lee et al, 2013; Boak y Turner, 2005; Richardson y LeDrew, 2006). La frecuencia de muestreo de los primeros tres métodos de percepción remota descritos se reduce a 1 o 2 veces al año (Kroon et al., 2007), excepto en caso excepcionales como son grandes tormentas donde se movilizan recursos económicos para cubrir zonas de desastre.

Las estaciones fijas de video monitoreo son sistemas automatizados de captación de imágenes de video que consisten en un conjunto de cámaras montadas generalmente sobre estructuras altas, las cuales están conectadas a una computadora que las controla, procesa productos estadísticos útiles para hacer mediciones, y los transfiere a un sitio de almacenamiento del cual suelen ser subidas a la internet (Holman y Stanley, 2007; Alarcón, 2008). Las ventajas de estos sistemas es que permiten la medición de características observables en el espectro de luz visible a través de distintos productos generados de imágenes digitales las cuales se adquieren a una alta frecuencia (usualmente cada hora durante el periodo de luz del día) y pueden ser implementados durante un largo periodo de tiempo, a un bajo costo (Ojeda et al. 2013; Boak y Turner, 2005).

Plant y Holman (1997) propusieron, como una alternativa a los métodos convencionales para obtener perfiles de playa, una técnica basada en la utilización de imágenes de video para obtener la elevación de la playa intermareal en un tramo entre 1 a 2 km a lo largo de la costa. En ausencia de olas el contorno que se puede observar en la intersección entre la playa seca y el mar se conoce como línea de costa del nivel de agua en calma (Still water level shoreline, SWLS). Con

el ascenso y descenso de la marea el SWLS se mueve tierra adentro y mar adentro, respectivamente. La obtención de los contornos de SWLS de manera repetida durante la oscilación de la marea genera un mapa de contornos de elevación de la playa intermareal. La SWLS en un estado ideal, en presencia de oleaje es eclipsada por la rotura y el swash. Plant y Holman (1997) utilizaron imágenes de exposición temporal para promediar las oscilaciones debido al swash y la rotura de oleaje y observar un aproximado de lo que sería el SWLS, el cual fue utilizado para definir la línea de costa. Utilizando el algoritmo Shore Line Intensity Maximum (SLIM) se detectan líneas de costa cada hora durante las variaciones del nivel del agua y de esta manera se obtiene un mapa tridimensional de la cara de la playa. Este método demostró una gran capacidad para detectar variaciones en la morfología de la playa cuando estas exceden el error debido al método, si la detección de la línea de costa se realizaba de manera adecuada por el algoritmo.

Aarninkhof (2003) propuso aprovechar las capacidades de las imágenes a color y generó un algoritmo que permitió discernir entre la playa seca y la playa húmeda utilizando las propiedades de color de cada uno, determinando la línea de costa como la intersección entre ambos elementos, y estableciendo la elevación basándose en información dada por la marea, las condiciones de oleaje y la relación con la batimetría. A esta técnica la llamo "Intertidal Beach Mapper" (IBM).

La detección la línea de costa en las imágenes de exposición temporal es una tarea crucial en la obtención del mapeo intermareal, por lo que se ha buscado mejorar y automatizar este proceso. El algoritmo Shore Line Intensity Maximum (SLIM), ya mencionado, fue el primero en desarrollarse con el fin de detectar líneas de costa de imágenes de video (Plant y Holman, 1997), este indicador detecta el máximo valor de brillo de transectos obtenidos a lo largo de zona intermareal de una imagen en escala de grises. El máximo valor de brillo está relacionado con la espuma producida por la disipación de energía en la zona de swash, la cual forma una franja de alta intensidad de luz paralela a la costa en imágenes de larga exposición temporal. El SLIM funciona de manera robusta en

playas reflejantes como es el caso de Duck, Carolina del Norte, donde fue desarrollado. Sin embargo, en playas más disipativas con presencia de barras intermareales el algoritmo suele fallar (Plant et al., 2007).

Para superar las limitaciones que representaba utilizar SLIM en playas disipativas y aprovechando los avances tecnológicos en la obtención de imágenes a color se desarrollaron para el sistema de video monitoreo ARGUS tres nuevos métodos: Pixel Intensity Cluster (PIC) (Aarninkhof et al., 2003); modelos basados en redes neuronales artificiales (ANN) (Kingston, 2003); y divergencia de canal de colores (CCD) (Turner, 2000). Estos tres métodos junto con SLIM fueron analizados por Plant et al. (2007) concluyendo que los 4 métodos son aplicables para distintos ambientes de la costa cercana, y pueden ser complementarios y comparables. Investigaciones posteriores se han concentrado en desarrollar nuevas metodologías (Quartel et al., 2006) así como automatizar el proceso de aceptación de líneas de costa detectadas (Uunk et al., 2010; Osorio et al., 2012) el cual para el IBM es un proceso supervisado por el usuario.

Aprovechando las ventajas de la Estación de Video-monitoreo, en Sisal se han desarrollado estudios sobre la dinámica de las barras submareales (Hervás, 2013), y su comportamiento asociado al espectro del oleaje durante eventos de Nortes (Souto, 2015); así como la caracterización de barras intermareales y la formación de “Ridge y Runnel” evaluando su relación con el viento (Ruiz, 2015). La identificación de las barras sub e intermareales, en estos trabajos se realizó basándose en el principio de que las olas al romper, debido a la presencia de las barras sumergidas, dibujan una franja de alta intensidad de brillo en las imágenes de exposición temporal, por lo que utilizando la herramienta BLIM, se identificó la intensidad máxima en perfiles que corresponden a cada columna de las imágenes de exposición temporal (Pape et al., 2010). Sin embargo, hasta este trabajo no se ha evaluado la detección de la línea de costa ni la obtención de productos a partir de estas como son los MDE de la cara de la playa para esta estación de monitoreo.

MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan la teoría y conceptos así como las técnicas y avances tecnológicos que permiten contextualizar el problema que este trabajo aborda. Primero se presentan de manera general algunos conceptos que permiten entender aspectos de la morfología y dinámica de las playas. En seguida, se expone, de manera breve, la historia del desarrollo de las herramientas utilizadas en el video monitoreo costero así como del sistema que es empleado en Sisal. Por último se presentan algunas técnicas utilizadas en el procesamiento digital de imágenes que son aplicadas en el método que se propone en este trabajo para detectar la línea de costa.

2.1 Morfodinámica de la playa.

Las playas y la zona cercana a la costa varían en el tiempo cuando cambian las condiciones de oleaje, a la vez las condiciones de oleaje y grado de cambio varían espacialmente con el ambiente. Wright y Short (1984) estudiaron la morfodinámica, y la hidrodinámica en las zonas de rompiente (surf) y playas en varias partes de la costa de Australia. De los trabajos que realizaron hicieron una clasificación de las playas en la que dependiendo de las condiciones ambientales locales, el sedimento, y las condiciones de oleajes precedentes, pueden ser disipativas, reflejantes, o alguna de cuatro condiciones intermedias: Intermedio con barra y canal longitudinal a la costa, Intermedia con presencia de “ritmicidades” en la barra y playa, Intermedia con barras transversales y canales de retorno, e Intermedia con terraza en bajamar y cresta y canal (ridge and runnel). Los estados de las playas varían con el tiempo en respuesta a cambios, por ejemplo, en la altura de oleaje en rotura, afectando los procesos hidrodinámicos que a su vez dirigen la evolución morfodinámica. Por otra parte el estado más recurrente de la playa representa una respuesta a las condiciones predominantes de rotura y características del sedimento.

2.1.1 Línea de costa

La línea de costa entendida como la intersección entre el agua y la tierra es una definición idealizada. Su aplicación no es práctica ya que esta cambia continuamente en el tiempo debido al movimiento del sedimento y sobre todo a la dinámica natural del nivel del agua (marea, oleaje, cambios eustáticos del nivel del mar). La información de la ubicación presente, pasada, así como predicciones de la ubicación futura de la línea de costa, son necesarias para distintas acciones de manejo costero como son: el diseño de estructuras de protección costera, la calibración y verificación de modelos numéricos, la evaluación del aumento del nivel del mar y la detección de zonas vulnerables, la creación de políticas que regulen el desarrollo costero y permitan definir límites para la propiedad legal, entre otras. Es por esto que la definición de la línea de costa debe considerar su variación espacial y temporal dependiendo de la escala de tiempo en que se realiza la investigación, teniendo en cuenta que debe haber un indicador suficientemente robusto, para permitir su identificación de manera objetiva y repetible (Boak y Turner, 2005).

Los indicadores de la línea de costa pueden variar de distinta forma para la misma costa, por ejemplo en la costa Noroeste de Shiermonnikoog, y la costa Oeste de Goeree en Holanda, se midieron por más de cien años 3 indicadores: la línea de marea baja media (MLW), la línea de marea alta media (MHW) y el pie de la duna, encontrando distintas tendencias para cada uno y siendo MLW el que presentó una mayor variabilidad, en contraste con el pie de la duna, que es mucho más estable (Stive et al, 2002).

Boak y Turner (2005) examinaron 45 indicadores de la línea de costa, los cuales en grandes rasgos se clasifican en tres categorías: Los que están basados en un elemento discernible de la costa, como el “High Water Line” o línea de marea alta, que corresponde al máximo rebase de ola y puede ser identificado manualmente de fotografías aéreas por la diferencia entre la playa mojada y la húmeda. Los segundos, basados en un datum específico de la marea, como el nivel medio del

mar o MHW. Estos pueden ser obtenidos fácilmente de modelos digitales de elevación generados por levantamientos topográficos, o levamientos LIDAR. La tercer categoría son los indicadores de la línea de costa obtenidos por técnicas de procesamiento de imágenes para obtener líneas de costa de imágenes digitales de estaciones de monitoreo. Estos últimos no siempre son discernibles por medio de la vista humana. Tienen como ventaja la posibilidad detectar cambios con buena resolución a lo largo de la costa, a una amplia escala temporal.

2.1.2 Cara de la playa

La variabilidad de la línea de costa es un indicador del comportamiento de una zona más amplia y compleja, la cara de la playa (Stive y de Vriend, 1995). La cara de la playa (shoreface - beach face) se describe como la sección del perfil de la playa bajo la berma con una ligera pendiente, que está expuesta a la acción de lavado (swash) de las olas. Por otra parte el frente de playa (foreshore) se define como la porción inclinada del perfil de playa que va desde la berma, o en su ausencia el límite superior del swash en marea alta, hasta la marca mínima de descenso del swash en marea baja. Es un término que suele considerarse como sinónimo de la cara de la playa, pero es más amplio al considerar la porción generalmente plana bajo del perfil de la cara de la playa (Komar, 1998). En la figura 3 se presenta un esquema de las partes que componen la playa. Para este trabajo se entenderá como cara de playa la porción de playa descubierta observable entre una imagen de exposición temporal de pleamar y otra de bajamar.

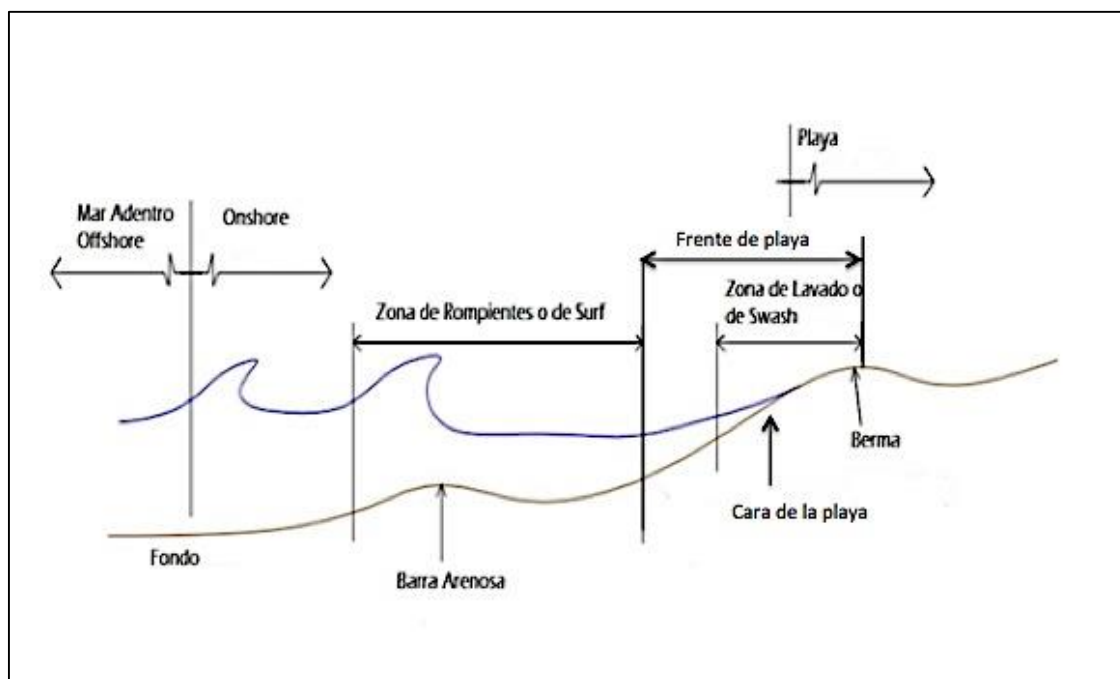


Figura 3. Perfil de playa donde se pueden observar los diferentes elementos que lo componen. (Modificado de <http://www.perfilesdeplayavoluntarios.com/>).

La pendiente de la cara de la playa está gobernada por la diferencia entre la intensidad del ascenso de la ola en la zona de swash y su descenso que resulta en un transporte perpendicular a la costa asimétrico. Debido a la percolación del agua en la playa, el descenso de la ola suele ser más débil que el ascenso. Esto provoca la acumulación de sedimento hacia la costa, hasta que la pendiente que se va generando y la gravedad favorecen el transporte fuera de la costa. Cuando la cantidad de sedimento transportado hacia la costa y fuera de esta es igual, la pendiente de la cara de la playa se vuelve constante, en un estado de equilibrio dinámico (Komar, 1998). El equilibrio de la pendiente de la cara de la playa depende en gran medida de la cantidad de agua que se pierde por la percolación. Esta, es controlada principalmente por el tamaño de grano y su grado de clasificación. Las playas compuestas de grava presentan un retorno de ola mucho más débil, ya que el agua se filtra más rápido en este. También se ha encontrado relación entre la pendiente de la cara de la playa y la pendiente del oleaje. Lo que

se ha observado en canales de oleaje es que a mayor pendiente del oleaje menor pendiente en la cara de la playa (Komar, 1998). Otro parámetro importante a considerar es la velocidad de caída de grano. Dubois (1972) encontró relación entre la pendiente de la playa y el porcentaje de minerales pesados en la playa lo cual tiene una alta relación con la velocidad de caída de grano, por las altas densidades de los minerales pesados.

2.1.3 Set-up

Cuando las olas de aguas profundas llegan a la parte somera de la playa, las ondas se acortan, se escarpan, y eventualmente rompen, pero continúan avanzando mientras su amplitud decrece. Cuando las olas rompen provocan un cambio en el estrés de radiación, el cual es el exceso de flujo de momentum debido a la presencia de oleaje. Este cambio produce variaciones en la elevación media de la superficie del mar (Longuet-Higgins y Stewart, 1964). Entre la línea de rotura y la playa el estrés de radiación disminuye produciendo una sobre elevación (set-up), que es un aumento del nivel medio del agua por encima de la elevación del mar en calma (SWL). Una disminución en la elevación con respecto a la altura de agua en calma ocurre hacia mar detrás de la línea de rompiente, a esto se le llama set-down. En otros términos, el set-up es una pendiente hacia la costa del nivel medio de la superficie del mar que provoca un gradiente de presión que balancea el estrés de radiación. Esta pendiente es menor que la pendiente de la cara de la playa, así que su intersección es la elevación efectiva de la línea de costa como puede observarse en la figura 4 (Komar, 1998). En términos prácticos se debe entender que el set-up aumenta conforme aumenta la altura del oleaje, y es especialmente importante durante tormentas.

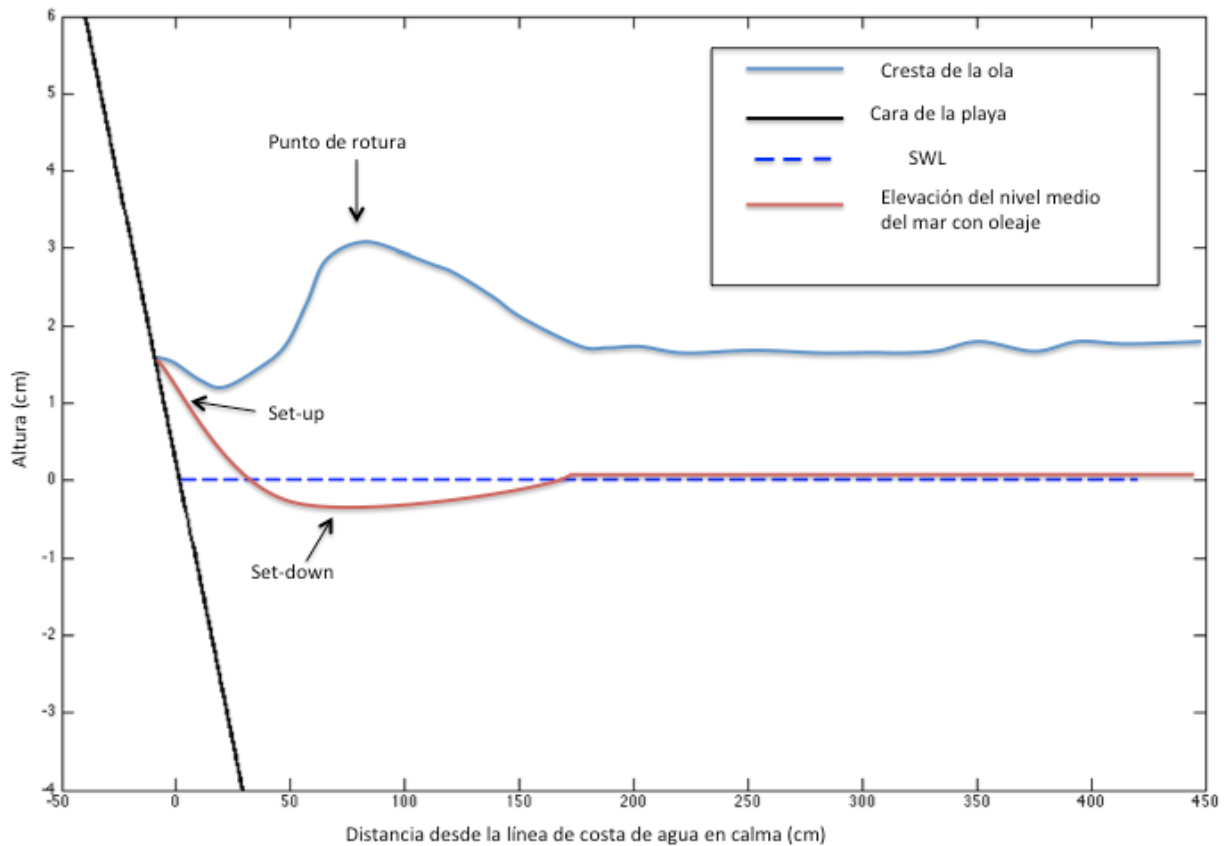


Figura 4. Set-up y Set-down provocado por el oleaje en la zona de rompiente. Elaboración propia basado en Komar (1998).

2.2 Video Monitoreo

La costa está llena de señales visuales que pueden ser aprovechadas para estudiar los procesos costeros. En los últimos 30 años se han desarrollado numerosos esfuerzos para aprovechar las señales observables en el espectro de la luz visible utilizando sensores ópticos (cámaras). El primer acercamiento para aprovechar dichas señales fue desarrollo en la Universidad estatal de Oregón, donde se utilizaron imágenes Time-lapse para capturar series fotográficas de remonte de ola (runup) a lo largo de la zona de swash. En ese entonces la mayor utilidad que se veía a la utilización de cámaras era la posibilidad de realizar mediciones en condiciones de tormenta. Fue hasta que se descubrió, por

accidente, las ventajas de las imágenes exposición prolongada, que el enfoque de la investigación cambio (Holman y Stanley, 2007). En estas imágenes se revelan patrones de bandas blancas en las áreas donde predomina la rotura de oleaje, estas bandas mostraron una fuerte relación con la presencia de barras sumergidas. El estudio de la variabilidad de las barras sumergidas utilizando estas nuevas técnicas mostró la necesidad de realizar mediciones a una alta frecuencia de tiempo por un largo plazo y de bajo costo, motivando el surgimiento de las estaciones de video monitoreo costero. La primer estación automatizada de Argus surgió en 1992, digitalizando imágenes en blanco y negro a 3.3 Hz y promediándolas. Actualmente se cuenta con la tercera generación de Argus que utiliza cámaras digitales de video que permiten la captura de imágenes a color a mayor resolución y con mayores frecuencias de muestreo (Holman y Stanley, 2007).

A partir de la implementación de Argus se han desarrollado múltiples herramientas basadas en imágenes digitales para medir distintos elementos de interés en las zonas costeras. Estos productos pueden dividirse en dos categorías: los que utilizan las imágenes completas y las series temporales de arreglos de pixeles. Los principales productos a partir de imágenes enteras son 3 y se describen a continuación:

Instantáneas (Snapshots), son simplemente una imagen capturada usualmente al principio de cada hora, esta no tiene aplicaciones cuantitativas, pero sirve para ver las condiciones del sitio en el momento de captura.

Imágenes de exposición temporal, conocidas en Argus como TIMEEX, representan la media matemática de las imágenes capturadas durante 10 minutos a una frecuencia de, generalmente, 2 FPS (cuadros por segundo- frames per second). Este tipo de imágenes promedian las ondulaciones naturales de la rotura del oleaje, que bajo ciertas condiciones revela una banda blanca que suele ser una buena aproximación para determinar la posición de barras sumergidas y la línea

de costa. Además remueven los objetos en movimiento del campo de visión como son personas y vehículos. Debido a estas cualidades es la imagen de exposición temporal la que se utiliza para encontrar la posición de la línea de costa.

Imagen de varianza, es similar a la imagen de exposición temporal pero en lugar de calcular el promedio se obtiene la desviación estándar. Estas imágenes presentan mayor intensidad de iluminación en las zonas donde la imagen varía más, mientras que los elementos estáticos aparecen oscuros. Su principal función es delinear las zonas de rotura y las regiones donde rompe el oleaje.

Por su parte los arreglos de pixeles aprovechan la información temporal de oleaje y corrientes observables a frecuencias de muestro variables. Estos pueden ser medidos utilizando sólo algunos pixeles sin necesidad de almacenar toda la imagen. Estos arreglos pueden ser diseñados dependiendo del elemento que se desee medir, por ejemplo periodo de oleaje (Lippmann y Holman, 1991), ángulo de incidencia del oleaje (Lippmann y Holman, 1991), corrientes longitudinales (Chickadel, 2003) y runup, que es medido utilizando el más común de estos arreglos, llamado timestack. (Holman y Guza, 1984).

Se han desarrollado una gran cantidad de estudios a partir de estas herramientas. Además de los estudios relacionados a la variabilidad de las barras submareales, utilizando la relación entre las bandas blancas observadas en las imágenes de exposición temporal y la posición de estas (Lippmann y Holman 1989; Alexander y Holman 2004; Ojeda et al., 2008). También se han desarrollado esfuerzos para obtener batimetría de la costa cercana utilizando la variación en la iluminación de la imagen (Holman et al, 1991). Otras técnicas buscaron aplicar técnicas estereográficas en la zona de swash para estimar la topografía (Holland y Holman, 1997).

Recientemente a través del proyecto CoastView (Davidson et al., 2007) se han realizado esfuerzos para que la información obtenida a partir de las estaciones de

video monitoreo sirva de herramienta para el manejo de las zonas costeras. Entre los principales objetivos de este proyecto se encuentran: simplificar las tareas de los manejadores costeros desarrollando Indicadores del Estado de la Costa (CSI) derivados de imágenes de videos, que estén relacionados directamente con alguna problemática de manejo y arrojen información del estado y tendencia del medio ambiente; desarrollar mejoras en los sistemas de video que permitan desarrollar estos indicadores en las escalas temporales y espaciales apropiadas; desarrollar algoritmos para estimar CSI; realizar mediciones en campo que permitan encontrar los límites de confianza de los CSI; y producir esquemas de predicción de la evolución del estado de la costa. Koningsveld et al., (2007) presenta una revisión de algunas implementaciones de manejo costero a partir de CoastView. Entre las aplicaciones desarrolladas, a modo de ejemplo, podemos mencionar: el manejo de canales de navegación (Medina, 2007); el manejo de playas recreativas estimando el nivel de uso de las playas y su seguridad (Jiménez et al., 2007); y el monitoreo y manejo de problemas relacionado a la estabilidad de las playas (Kroon et al., 2007).

2.2.1 Sistema Remoto de Monitorización de Playas SIRENA

Debido al potencial observado con la comercialización del sistema de video monitoreo Argus y las múltiples aplicaciones presentadas, han surgido nuevos sistemas de monitoreo costero. Archetti et al. (2008) y Nieto et al. (2010) presentan por separado una comparación de estos sistemas, resaltando que todos los sistemas ofrecen productos estadísticos homónimos (imágenes de exposición temporal, varianza, snapshots y timestacks) y presentan un mayor o menor grado de desarrollo de rutinas postproceso para la medición de datos de interés. Sin embargo la mayoría son distribuidos de forma cerrada (cajas negras), lo que no permite al usuario final reemplazar o modificar las rutinas de adquisición de datos y su procesamiento (Ojeda et al., 2013).

El Sistema Remoto de Monitorización de Playas (Sirena) es un sistema de video monitoreo costero de código abierto inicialmente desarrollado por el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA) el cual ha sido modificado y mejorado de manera conjunta entre el Instituto de Ciencias del Mar en Barcelona y el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Este puede ser descargado de manera gratuita a través de la página web <https://sirena-remote.svn.sourceforge.net/svnroot/sirenaremote>. El hecho que sea de código abierto permite una constante evolución adaptándose a las condiciones de trabajo de cada sitio. Una descripción completa del sistema puede encontrarse en Nieto et al. (2010). Ojeda et al. (2013) reportan que al menos 10 sitios distribuidos entre España, México y Francia operaban estaciones Sirena, contribuyendo a su desarrollo.

2.2.2 Calibración de las imágenes

Para que sea posible cuantificar la información contenida en las imágenes de video es necesario transformar de la coordenadas 2D de las imágenes (u, v) a coordenadas 3D que describen el mundo (x, y, z) (Holland y Holman, 1997). Esta transformación requiere de dos conjuntos de parámetros: parámetros intrínsecos y extrínsecos.

Los lentes de video presentan una distorsión radial Δr que incrementa cuando disminuye la distancia focal y disminuye la calidad del lente (Aarninkhof, 2003). Para corregir este problema es necesario calcular ciertos parámetros que son intrínsecos a los equipos ya que reflejan características físicas de la lente, la cámara y el hardware que las adquiere. Los parámetros intrínsecos que se estiman son: el factor de escala vertical y horizontal de la imagen, los coeficientes necesarios para eliminar la distorsión, y las coordenadas idealizadas del centro de la imagen (Holland y Holman, 1997). La calibración intrínseca sólo es necesaria realizarla una vez, por lo que los parámetros intrínsecos de cada cámara se

obtienen en laboratorio antes de colocar las cámaras en campo, usando la aplicación Camera Calibration Toolbox para Matlab® (disponible en <http://www.vision.caltech.edu/bouqueti/>). Estimar estos parámetros involucra un gran número de observaciones de puntos de control, correctamente medidos. El método consiste en adquirir una serie de imágenes de un objeto de dimensiones conocidas, como la tabla de patrones que se observa en la figura 5, y estimar el conjunto de parámetros que haga mejor coincidir la proyección computada de las estructura con la observación proyectada en la imagen (Zarruk et al., 2008).

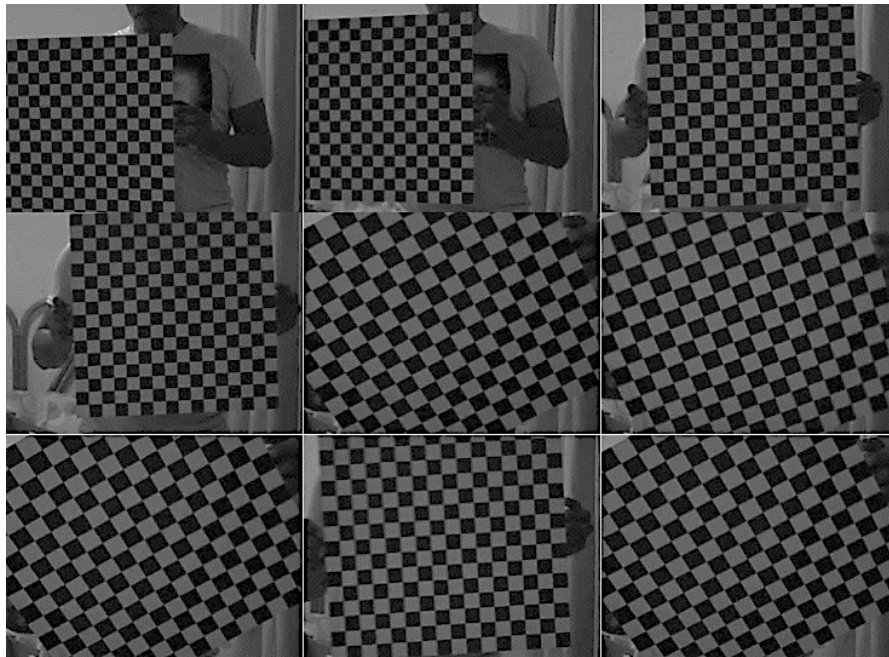


Figura 5. Ejemplo de tabla e imágenes requeridas para estimar parámetros intrínsecos.

Los parámetros extrínsecos comprenden una descripción geográfica de la ubicación de la cámara y su orientación relativa a un sistema de coordenadas. Se requiere obtener once coeficientes colineales que transformen un punto (x, y, z) del espacio real a coordenadas de imagen (u, v) . Obtenido esto, cualquier punto de la imagen puede ser asociado a un punto en el espacio real asumiendo una superficie dada (Que puede ser $z=0$ o la altura de la marea) (Ojeda et al., 2013). Las expresiones colinéales son:

$$u = \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1}$$

$$v = \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1}$$

Donde los once coeficientes colineales son L_j para $J=, 1, 2,3...11$.

Los once coeficientes colineales no son independientes, dependen de siete variables: tres coordenadas de la cámara en el espacio real (x_c, y_c, z_c), tres ángulos que definen la orientación de la cámara (azimut ϕ , inclinación τ , y rotación σ), y un valor relacionado con las distancia focal (f). En la figura 6 se presenta la relación entre una imagen oblicua y su proyección en vista planta observando las variables requeridas para la transformación

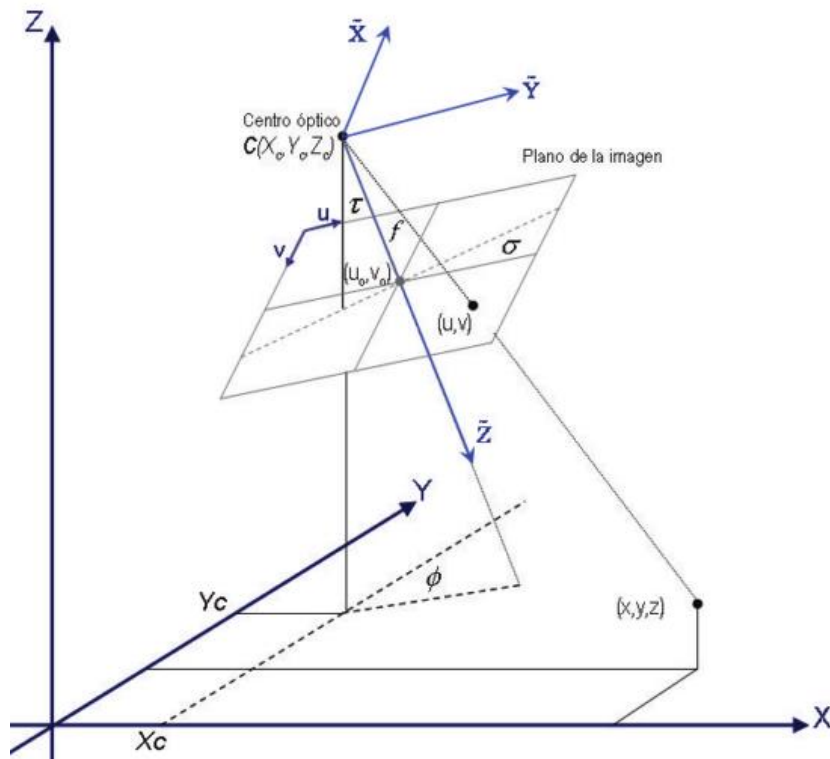


Figura 6. Proyección de imagen en vista oblicua en coordenadas de imagen (u, v) a vista en planta con coordenadas reales (x, y, z). Se observan los parámetros requeridos para

resolver las ecuaciones que permiten hacer esta transformación que son las coordenadas de la cámara (x_c , y_c , z_c) y los ángulos de rotación (ϕ , τ , y σ). (Fuente: Osorio et al., 2007).

El Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros y el Instituto de Ciencias del Mar en Barcelona han trabajado en programas basados en Matlab® para el cálculo de los parámetros extrínsecos. En este sentido, el programa obtiene los 7 parámetros minimizando el error global que combina tres errores: el error de representación de puntos de control en tierra, el error de representación del horizonte, y el error de las coordenadas de la cámara (Ojeda et al., 2013).

2.3 Procesamiento digital de imágenes.

2.3.1 Espacio de color RGB y HSV

En el modelo o espacio de color RGB las imágenes son representadas por tres componentes que corresponden a los colores primarios rojo, verde y azul. El ojo humano es bastante receptivo ante estos colores, sin embargo los colores no están formados solamente por estos tres, y este modelo no es una buena representación del color desde el punto de vista de la visión humana. El sistema de visualización humana cuando observa un objeto a color lo caracteriza por su brillo y su cromaticidad. El brillo es una medida de la intensidad de la luz, y es acromático. La cromaticidad está dada por el tono o matiz (hue) y la saturación. El tono es un atributo que representa el color dominante. La saturación expresa el grado de pureza relativo en la que un color puro está diluido en blanco. El modelo HSV (matiz, saturación y valor de brillo, en español) está diseñado basándose en la visión humana. En este, el componente luminoso que es el brillo se encuentra separado de la información del color (tono y saturación) (Chen et al., 2007).

El modelo HSV se define del RGB en la siguiente forma:

$$H = \begin{cases} 60\left(\frac{G-B}{\delta}\right) & \text{si } MAX = R \\ 60\left(\frac{G-B}{\delta}+2\right) & \text{si } MAX = G \\ 60\left(\frac{G-B}{\delta}+4\right) & \text{si } MAX = B \\ \text{no definido} & \text{si } MAX = 0 \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} \frac{\delta}{MAX} & \text{si } MAX \neq 0 \\ 0 & \text{si } MAX = 0 \end{cases}$$

$$V = MAX$$

Donde $\delta = (MAX-MIN)$, $MAX=\max(R,G,B)$ y $MIN=\min(R,G,B)$.

El matiz varia de 0 al 1 a lo largo del espectro de color tomando valor de 0 para el rojo pasando por el naranja, amarillo, verde ($h=0.5$), azul, morado, y de vuelta al rojo en el valor de 1. La saturación también va de 0 a 1 siendo 0 cuando el color es blanco o negro y 1 en los colores primarios: rojo verde y azul; y secundarios: cian, magenta y amarillo. Asimismo el rango del brillo va de 0 a 1 siendo 0 para el negro y 1 para el blanco. La figura 7 es una representación del espacio de color HSV donde se puede observar como los tres componentes forman un color dado.

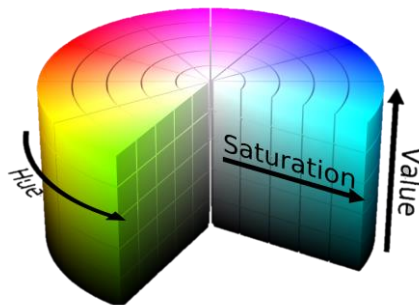


Figura 7. Espacio de color HSV representado a travez de un cilindro (Fuente: Wikipedia)

2.3.2 Algoritmos de detección de bordes.

En el procesamiento digital de imágenes encontrar los cambios o discontinuidades locales en la iluminación de una imagen, llamados bordes, es una tarea común y necesaria para la detección de elementos de interés (Pratt, 2001). Debido a que los bordes están relacionados directamente con el comportamiento del pixel y su vecindad, se utilizan operadores de gradiente mediante la convolución con una sub matriz llamada kernel o mascara. A esta operación también se le conoce como filtrado en el dominio espacial, el proceso consiste en recorrer cada punto de la imagen con la máscara de convolución. Los tipos de operadores para buscar bordes son muy variados, a continuación se presentan algunos de los más utilizados.

2.3.1.1 Sobel

La mayoría de los operadores se aproximan a la primera derivada de la imagen y aplican un umbral para detectar bordes. Un ejemplo de estos operadores es el operador Sobel. Este utiliza una máscara direccional, por lo que busca bordes que van de arriba abajo y de izquierda a derecha:

$$Sobel \quad \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Si no se observan cambios en el valor, al pixel se le asigna valor 0, en cambio en áreas donde los valores de los pixeles son variables adquiere un valor proporcional al grado de cambio, si en ese pixel se encuentra un borde el valor debe ser mayor a un umbral especificado (Quiroz et al., 2009) .

2.3.1.2 Laplaciano de Gaussiano

Otros operadores buscan cruces por cero en la segunda derivada de la imagen. El método Laplaciano de Gaussiano (LoG) aplica primero un filtrado Gaussiano de dos dimensiones a la imagen, ya que la segunda derivada es muy sensible al ruido y aplica una máscara de convolución que se aproxime a la segunda derivada.

Ambos procesos pueden asociarse a una sola máscara de convolución. Aplicado el proceso se buscan los cruces por cero de la nueva imagen los cuales representan los bordes.

2.3.1.3 Canny

El algoritmo Canny es considerado uno de los más efectivos a la hora de detectar bordes, ya que busca satisfacer tres criterios: buena detección, ya que no habrá respuestas falsas a bordes restantes; buena localización, donde se busca minimizar la distancia entre la ubicación del borde real y el punto de borde localizado; Y un criterio de respuesta, que busca minimizar las respuestas múltiples a un sólo borde. El método realiza los siguientes pasos para detectar bordes cumpliendo los criterios establecidos (Quiroz et al., 2009; Osorio et al., 2012):

- Suaviza la imagen con un filtro gaussiano para reducir ruido.
- Se calcula el gradiente local y su dirección para cada punto, esto puede hacerse con el operador Sobel.
- Se define como punto de borde los puntos que son considerados máximos locales en la dirección del gradiente.
- El algoritmo busca los máximos como si fueran la cima de una cresta, generando una línea y convirtiendo los demás valores a 0. Los valores de la línea generada se comparan con dos umbrales $T1$ y $T2$, donde $T1 < T2$ y los valores mayores a $T2$ son bordes probables y los bordes entre $T1$ y $T2$ son bordes poco probables. Al final se unen píxeles de los candidatos poco probables que están conectados en vecindad 8 a los bordes probables.

2.3.2 Obtención de umbrales.

En el procesamiento de imágenes es importante seleccionar el umbral adecuado para separar objetos de su entorno. La obtención de umbrales se utiliza sobre todo en ambientes controlados donde existe una gran similitud entre los píxeles del objeto y una clara diferencia entre los píxeles de un objeto y otro. En estos casos

el histograma de la imagen presenta un valle bien marcado entre dos picos por lo que el umbral puede seleccionarse como el fondo del valle. Sin embargo en fotografías en entornos naturales es difícil encontrar el fondo del valle debido al ruido de la imagen y a que los picos del histograma pueden tener distintas alturas. Para encontrar el umbral que mejor segmente la imagen se han propuesto diversos métodos. Estos pueden clasificarse en métodos paramétricos y no paramétricos. Los métodos paramétricos se basan en la distribución de valores del histograma. En cambio, los métodos no paramétricos utilizan algún criterio para identificar el umbral óptimo.

2.3.2.1 Método Otsu

El método Otsu (Otsu, 1979) es un método no paramétrico que encuentra el valor umbral óptimo maximizando la varianza entre clases. Una ventaja del método Otsu es que es automático, ya que no necesita supervisión humana ni información previa de la imagen antes de su cálculo. Este es el método que es más ampliamente utilizado para umbralizar imágenes que no están en ambientes controlados.

JUSTIFICACIÓN

En la Agenda 21 capítulo 17 (CNUMAD, 1992), se aborda el tema de la protección y uso de los océanos, mares y zonas costeras. Entre las bases para la acción que recomienda el documento, se señala la importancia de la observación sistemática de parámetros que puedan ayudar a la evaluación del impacto del cambio climático en la costa. En este sentido, el monitoreo de la línea de costa y de la topografía de la cara de la playa a través del tiempo son elementos claves para el manejo y la ingeniería costera. Las aplicaciones prácticas que pueden resultar incluyen identificación y cuantificación de la erosión de la línea de costa, cuantificación del desempeño de las estructuras de protección así como delimitación de zonas de vulnerabilidad.

Los avances realizados, hasta ahora, con el sistema SIRENA para la estación de Sisal, permiten la medición de elementos de la costa, como lo demuestran los trabajos de Hervás (2013) Ruiz (2015), y Souto (2015). Sin embargo, no se cuenta con una herramienta que permita obtener líneas de costa de las imágenes. La extracción, a partir de las imágenes de video, de la posición de la línea de costa a un nivel de marea conocido se ha mostrado como uno de los indicadores más útiles para obtener información relevante ya que requiere de un número reducido de imágenes y poca información de campo. La identificación de la línea de costa varía según el sitio de estudio y depende de las características geomorfológicas e hidrodinámicas de los distintos ambientes (Plant et al, 2007). Además en un mismo sitio la visualización de la línea de costa se ve afectada por la variación de la iluminación a lo largo del día y del año, la exposición que tiene cada cámara a la luz, las variaciones en las condiciones meteorológicas y otros factores dependientes de cada zona de estudio. Las herramientas que se han diseñado para otros sistemas se venden como parte del paquete que se obtiene al adquirir las estaciones de monitoreo. Por lo que se necesita desarrollar los algoritmos y herramientas que permitan la detección eficiente de la línea de costa, considerando las condiciones particulares de la costa de Sisal, manteniendo el bajo costo que se busca al instalar una estación video monitoreo costero.

Por otra parte, la obtención de modelos de elevación de la playa intermareal, a partir de líneas de costa asociadas a un nivel de elevación del mar, permiten obtener mayor información de dinámica de la playa. Por ejemplo: la pendiente de la playa es una variable fundamental que controla el comportamiento de las olas induciendo su asomeramiento y rotura. Ya que las olas modulan el transporte de sedimento, y la morfología de la playa afecta el oleaje, la pendiente de la playa intermareal es un parámetro importante, que puede servir como dato de entrada o de validación de modelos de la evolución de la playa (Madsen y Plant, 2001). Asimismo al calcular la diferencia entre modelos de elevación obtenidos a distintos periodos de tiempo permite calcular la distribución espacial del cambio neto en la elevación de la cara de la playa, así como estimar el cambio de volumen de arena a lo largo de la playa (Turner y Anderson, 2007). La obtención de modelos de elevación mediante estas técnicas tiene que ser validado para cada zona de estudio.

OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis es generar un modelo de elevación de la cara de la playa en la zona intermareal de la playa de Sisal, Yucatán, utilizando líneas de costa extraídas de cámaras de video y datos del nivel del mar.

Para alcanzar los objetivos expuestos se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Desarrollar los programas necesarios para obtener la línea de costa de manera automatizada, adaptados a las condiciones particulares de la costa de Sisal.
- Evaluar los errores de la detección de la línea de costa a partir de líneas de costa digitalizadas manualmente y de datos medidos en campo con GPS.
- Correlacionar la altura de marea con los contornos de la línea de costa para generar un modelo de elevación y validar el modelo con información de campañas en campo.

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio es una porción de la playa del puerto de Sisal, que pertenece al municipio de Huncumá en el estado de Yucatán (figura 8). La península de Yucatán es una placa caliza formada por el depósito de sedimentos carbonatados sobre roca caliza antigua. La plataforma continental, tiene una amplitud de 245 km y se extiende hacia el norte con una pendiente aproximada de 1/1000. La parte emergida presenta una topografía cárstica que carece de un sistema de drenaje superficial. La zona litoral de Yucatán está conformada por un sistema de lagunas costeras que preceden a una isla de barrera discontinua con largas áreas de manglares (Cuevas-Jiménez y Euán-Ávila 2009; Enriquez et al 2010). El régimen de mareas es mixto y predominan las mareas diurnas, con mareas semi-diurnas durante las mareas muertas. El rango de marea varía de 0.15 metros en mareas muertas hasta 1 metro en mareas vivas (Enriquez et al, 2013).

El clima de Sisal es cálido húmedo con una temperatura promedio de 22° antes del amanecer, alcanzando 29° al medio día. La humedad promedio ronda entre el 75% y 85%. Los vientos dominantes provienen del noreste y sureste, con una importante aportación de las brisas (Figueroa-Espinoza et al, 2014). Para el Golfo de México la altura de oleaje significativa media en la zona es de 1.25 m con un periodo pico medio de 6.28 s (Appendini et al. 2014). La costa de Yucatán se ve afectada por eventos de oleaje intenso generado por viento extremo los cuales son producidos por sistemas de alta presión polares que generan frentes fríos, conocidos como Nortes, durante el invierno y por tormentas tropicales y huracanes durante el verano (Appendini et al, 2012). Mendoza y Trejo-Rangel (2013) reportan para la zona de Sisal, un número de Iribarren entre 0.6 y 0.7, una pendiente de la cara de la playa cercana a 0.1 y un tamaño de grano entre 0.4 y 0.5 mm

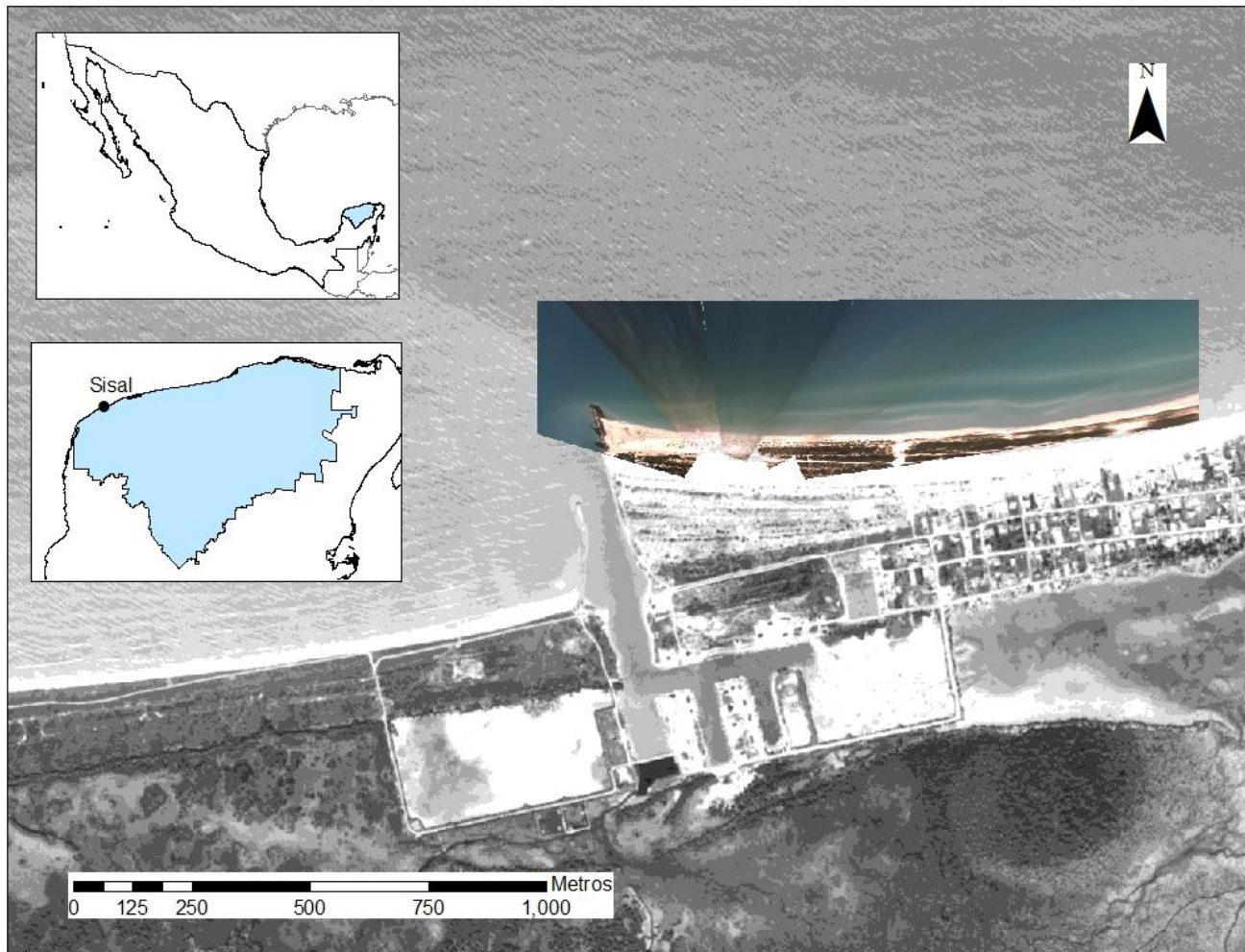


Figura 8. Localización del área de estudio, el panel superior izquierdo muestra la ubicación de Yucatán en México. El panel inferior izquierdo muestra la localización del puerto de Sisal en el estado de Yucatán. En el panel principal se presenta una vista aérea de la población de Sisal, en color se muestra la sección de la playa observada desde la estación de monitoreo por las 5 cámaras, que corresponde al área de estudio.

METODOLOGÍA

En la siguiente sección se presenta la metodología seguida para la obtención de modelos digitales de elevación de la cara de la playa utilizando imágenes obtenidas a partir de un sistema de video monitoreo remoto. En la figura 9 se presenta en un esquema la metodología, basada en el trabajo de Aarninkhof (2003), con los pasos seguidos para obtener la línea de costa y a partir de ellas generar los modelos de elevación. Esta metodología es aplicable para playas con poca pendiente y con presencia de barras intermareales.

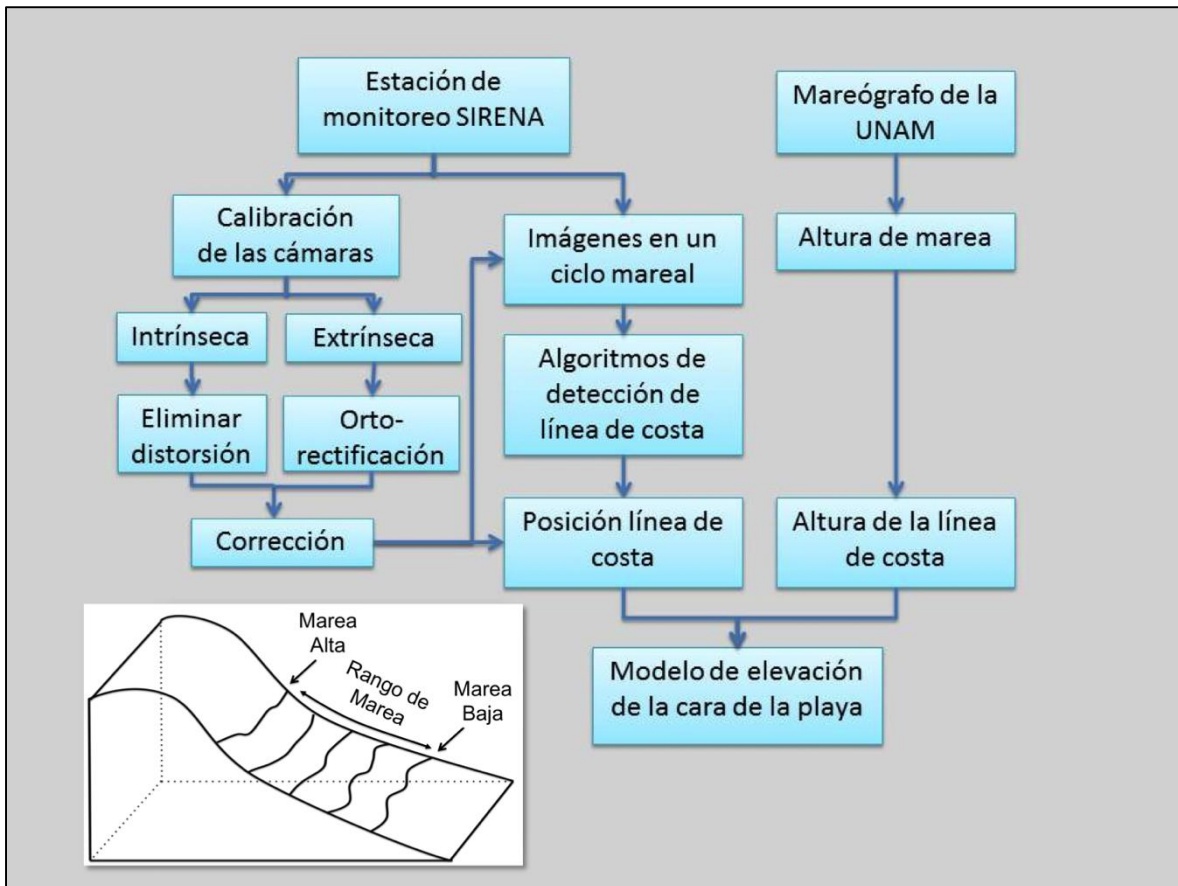


Figura 9. Esquema de la metodología empleada para el mapeo de la playa intermareal utilizando líneas de costa obtenidas a lo largo de un ciclo de marea.

6.1 Obtención de imágenes

En Sisal, la estación de video monitoreo fue instalada en Noviembre de 2011 trabajando con 2 cámaras, y a partir de agosto de 2013 con 5 cámaras, AVT Stingray F125CF (figura 10) con conexión de fibra óptica y firewire (Ojeda et al., 2013). Las cámaras están instaladas en una torre meteorológica a 44 metros dentro de la Unidad Académica Sisal (figura 11).



Figura 10. Cámara Stingray dentro de carcasa protectora.

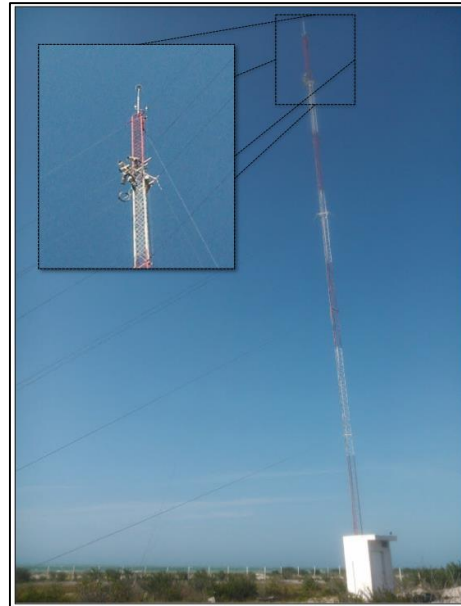


Figura 11. Cámaras montadas en la torre de la estación meteorológica.

Las 5 cámaras de la estación de Sisal están programadas para capturar imágenes diariamente entre las 11 y las 23 horas UTC. Estas cubren desde la entrada del puerto de abrigo hasta el muelle de Sisal en un tramo aproximado de 1.5 km (figura 12). Las imágenes son enviadas por fibra óptica a una computadora en tierra la cual opera las cámaras y genera cada media hora 3 productos: una imagen instantánea (snapshot), imagen de exposición temporal e imagen de varianza. La figura 13A presenta una imagen instantánea, la figura 13B una imagen de exposición temporal, estas son obtenidas al promediar la imágenes instantáneas adquiridas durante 10 minutos cada media hora a una frecuencia de 3 cuadros por segundo (fps). La figura 13C presenta una imagen de varianza la cual se obtiene de la misma forma que la de exposición temporal pero obteniendo

la desviación estándar. Estos tres productos son subidos a la red y pueden ser descargados a través de la página: <http://tepeu.sisal.unam.mx/video-sisal/images.jsp>.

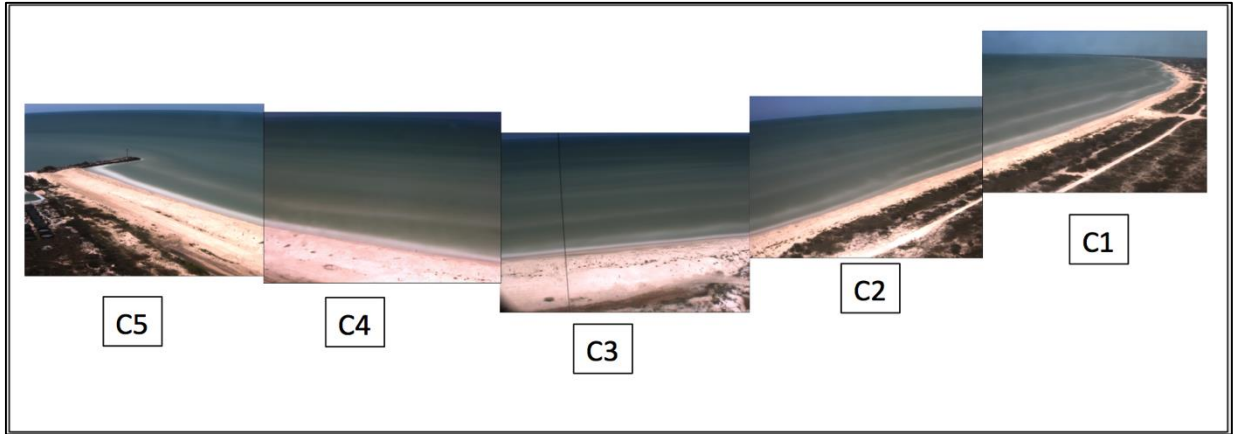


Figura 12. Ejemplo de las imágenes de exposición temporal de las 5 cámaras donde puede observarse el área de la playa que cubren

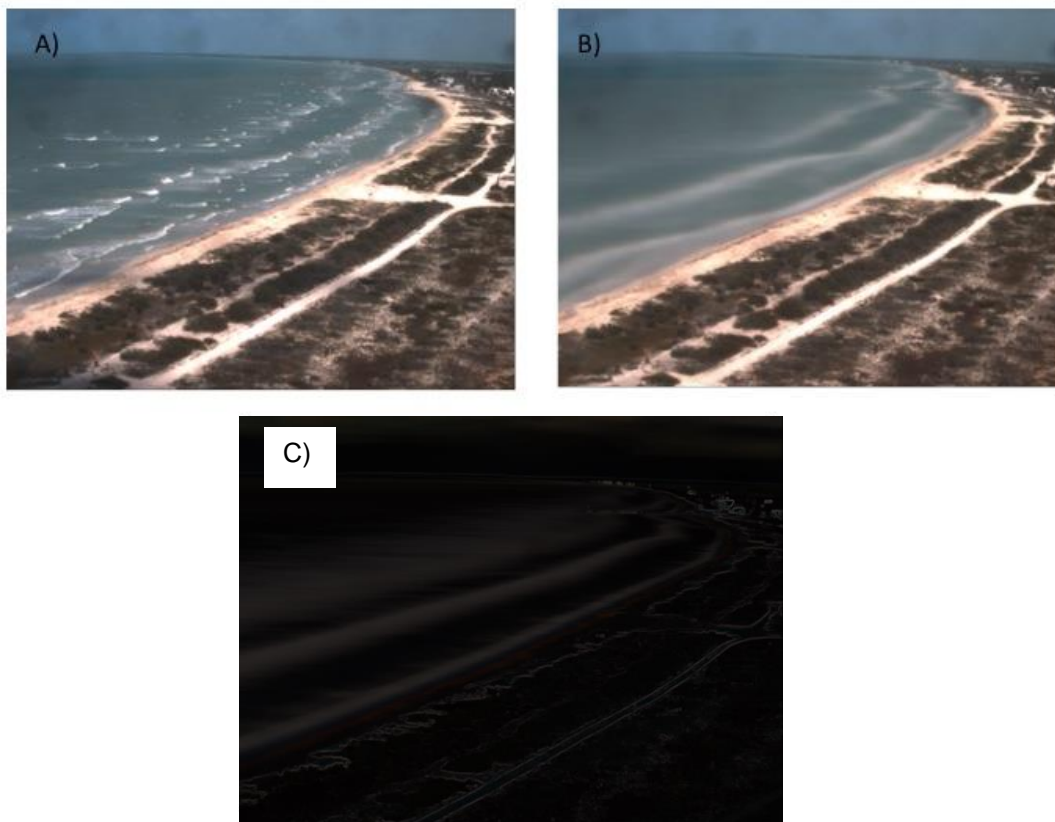


Figura 13. Imágenes generadas para una cámara A) Imagen instantánea B) Imagen de exposición temporal C) Imagen de Varianza.

6.2 Calibración de imágenes

Como se describe en el Marco Teórico de esta Tesis, es necesario calcular los parámetros intrínsecos y extrínsecos asociados a las cámaras para realizar mediciones a partir de las imágenes de video. Se calcularon los parámetros extrínsecos a partir de agosto del 2013 que es cuando empiezan a operar las 5 cámaras, los parámetros intrínsecos fueron previamente calculados antes de instalar cada cámara.

Para obtener los parámetros extrínsecos es necesario conocer la posición geográfica de las cámaras y de puntos de control en tierra. Se midió la posición de las cámaras y de los puntos de control en cuatro campañas: el 27 de septiembre, el 10 de octubre del 2013, el 11 de junio y el 20 agosto del 2015. Su ubicación espacial se obtuvo utilizando GPS referencial Magellan en la primeras dos fechas, y utilizando GPS en modo RTK (del inglés Real Time Kinematic) marca Leica en las últimas dos. Se colocaron una serie de postes pintados de naranja en los sitios donde no había una referencia clara de los puntos de control. Esto con el objetivo de que fueran fácilmente identificables desde las imágenes los puntos medidos. La posición de los puntos de control se identifica dentro de las imágenes para obtener sus coordenadas (u, v) , y se seleccionan de la imagen un conjunto de puntos en el horizonte. Con esta información se calculan los parámetros extrínsecos utilizando rutinas basadas en Matlab®.

Una vez obtenidos ambos conjuntos de parámetros se transformaron las imágenes oblicuas de las 5 cámaras a vista en planta (Planview), utilizando un programa desarrollado en Matlab®, asumiendo una altura dada por la elevación de la marea y creando una sola imagen de mosaicos compuesta de las 5 cámaras.

6.3 Detección de línea de costa

Debido a las diversas condiciones de: iluminación, morfología de la playa, hidrodinámica y capacidades técnicas de las cámaras de los lugares donde se han aplicado las técnicas de video monitoreo para evaluar la morfodinámica costera, se han desarrollado diversas metodologías para detectar la línea de costa. En los Antecedentes de este trabajo se mencionaron cuatro de estos: SLIM, PIC, ANN, y CCD. El algoritmo PIC (Aarninkhof et al., 2003), es el utilizado por defecto en Argus para detectar la SWLS (por ejemplo, Kroon et al., 2007; Ojeda y Guillén, 2008; Ruiz de Alegria-Arzaburu y Masselink, 2010) y es la base para el desarrollo del algoritmo planteado en este trabajo. Es importante mencionar que nuevos métodos han sido desarrollados posteriores a los mencionados. Estos métodos funcionan aplicando técnicas clásicas de procesamiento digital de imágenes para detectar bordes; adaptando algoritmos como es el caso de Ratios RGB basado en CCD (Osorio et al., 2012); y creando nuevos algoritmos como Pattern WL (Osorio et al., 2012) o clasificación orientada a objetos (Quartel et al., 2006).

Basándose en los métodos mencionados, en este trabajo se desarrolló un algoritmo de detección de la línea de costa para las condiciones particulares de la playa de Sisal. A continuación se describen los pasos del algoritmo.

6.3.1 Extracción de ROI

El primer paso consiste en la extracción de una región de interés (ROI por sus siglas en inglés) de la imagen en vista oblicua. Las ROI están diseñadas de modo que cumplan las siguientes necesidades: 1) representar bien las secciones de mar y playa; 2) que la línea de costa siempre esté dentro de la región, considerando las variaciones en su posición; 3) evitar ruidos innecesarios para el procesado (vegetación, cielo, etc.); y 4) disminuir el cálculo computacional al disminuir el tamaño de la matriz a procesar. Para cumplir estas condiciones se diseñaron cinco ROI que corresponden a la vista de la playa de cada cámara. Estas regiones de

interés se generan a partir de una recta paralela a la costa y trazando perpendiculares a la recta a una distancia de un pixel cada uno. Los pixeles sobre los cuales pasa la perpendicular corresponden a una columna en la nueva imagen. Los siguientes pasos del proceso de detección se realizan en a cada una de las cinco ROI.

6.3.2 Transformar RGB a HSV

Con la información del color independiente del brillo se observó que es más fácil distinguir entre la playa seca y la playa húmeda (Aarninkhof, 2003). Por esto las imágenes de la estación que se presentan en el espacio cromático RGB se transforman al espacio HSV para aplicar el algoritmo de detección de la línea de costa. Al realizar esta transformación se acomoda la información en 3 matrices que corresponden a H, S, V.

6.3.3 Filtrado y re escalado de las matrices

Cada matriz es filtrada para eliminar valores puntuales máximos usando la media y la desviación estándar. Se multiplica la desviación estándar por un factor tal que sólo se mantenga el 99% de los datos. La matriz filtrada se re-escala al dominio [0 1] sumando el valor mínimo y dividiendo entre el máximo.

6.3.4 Obtención de umbrales y binarización de matrices.

La iluminación y color en las imágenes de exposición temporal que se generan para cada cámara varia con el paso de las horas debido a la orientación de la cámaras y las características de cada zona de estudio entre las que destacan: la intensidad de luz solar, la presencia de algas en la costa y el oleaje. Debido a esto se plantearon tres métodos distintos usando umbrales, los cuales arrojan una línea de costa específica para cada método, de las cuales el usuario posteriormente deberá seleccionar cuál elegir. Los tres métodos son: Media HS, Media HSV y Otsu HS.

6.3.4.1 Umbral Media HS

Si se traza la media de todos los píxeles de la matriz H y S pueden observarse dos agrupaciones de píxeles (figura 14). Dado que esta condición se repite en la mayoría de las imágenes revisadas. Se seleccionó la media aritmética como valor umbral para discriminar entre los píxeles de playa seca y playa húmeda.

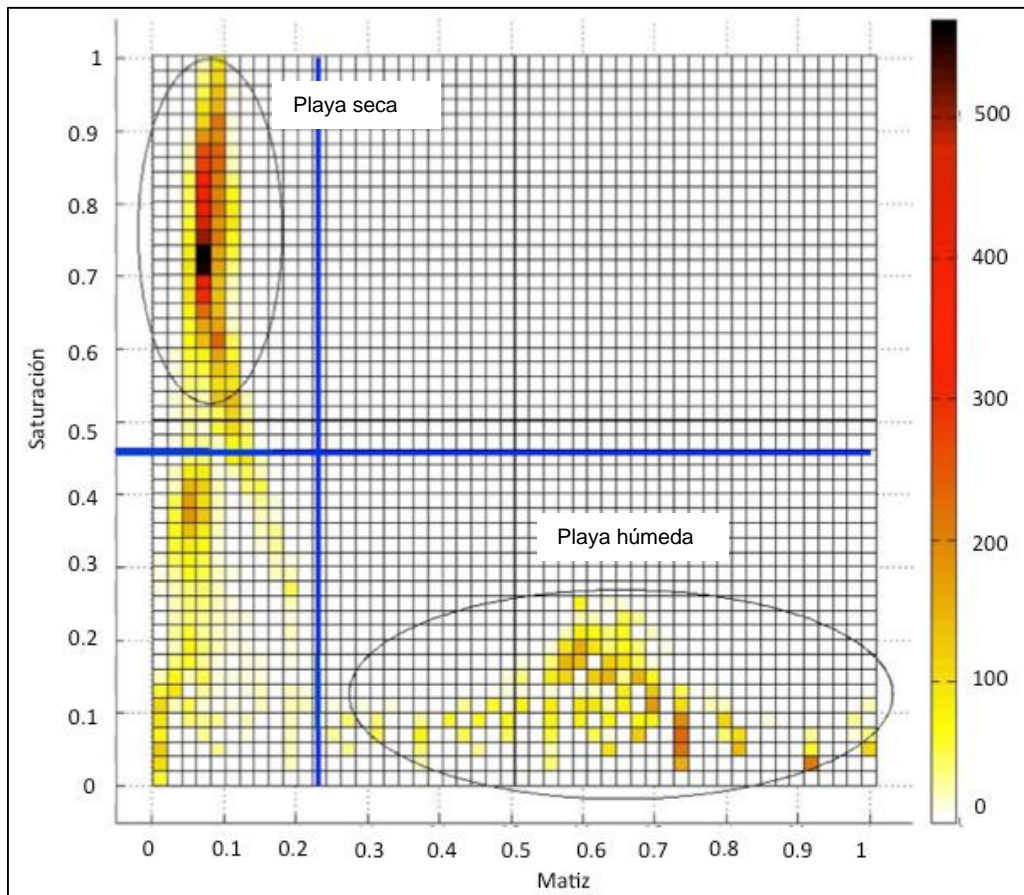


Figura 14. Histograma de dos dimensiones. En el eje X se representa la dispersión de los píxeles en el matiz (Hue) mientras que el eje Y es la dispersión en la saturación. La barra de color representa la concentración de píxeles. Las líneas azules son la media de cada matriz y las elipses resaltan las agrupaciones de píxeles.

De esta forma las matrices re-escaladas son binarizadas a partir de un valor umbral dado por la media. Los valores menores al valor umbral se igualan a 0, y los mayores a 1. En esta condición la playa seca (arena y vegetación) queda definida por el matiz menor al umbral ($H=0$) y la saturación mayor al umbral ($S=1$), definiéndose el agua como las demás combinaciones posibles distintas a las que definen la playa seca. Una nueva imagen binaria se crea definida por el agua = 0 y playa seca =1.

6.3.4.2 Umbral Media HSV

Los pixeles de la imagen cuya matiz y saturación se encuentran debajo de la media ($H=0$ y $S=0$) son zonas claras que suelen estar relacionadas con un alto brillo. Estas zonas pueden corresponder tanto a la playa seca como a la playa húmeda, bajo ciertas condiciones de iluminación y sobre-exposición a la luz por parte de las cámaras pudiendo relacionarse con la zona de surf, el reflejo del sol en el mar o el brillo sobre la arena. Para el algoritmo anterior estos pixeles se clasifican como valores de playa húmeda. Sin embargo, considerarlos así puede representar un error para la clasificación. Debido a esto se creó un algoritmo paralelo el cual considera también la matriz de brillo V . Esta matriz se binariza de la misma forma que las anteriores y agrega a la playa seca los pixeles cuyo valor de brillo este por arriba de la media y $H=0$ $S=0$. Quedando definida la playa seca por $H=0$ $S=1$ $V=0$ o $V=1$ y agregando la combinación $H=0$ $S=0$ y $V=1$. Así, al igual que con el umbral anterior se crea una nueva matriz donde los valores que corresponden a la playa seca se les asigna el valor de 1 y los que corresponden a agua se le asigna un valor de 0.

6.3.4.3 Umbral HS-Otsu

Al revisar los métodos de obtención de umbrales descritos en la literatura para el procesamiento digital de imágenes se identificó el método Otsu para encontrar un valor umbral óptimo. (Otsu, 1979). Debido a las ventajas que se describen en el capítulo anterior se eligió este método para obtener umbrales óptimos. Con este nuevo valor umbral se obtiene una imagen binarizada de la misma forma que con la media HS.

6.3.5 Obtención matriz borde

A las imágenes binarias se le aplica un filtro para volver más uniforme las regiones de playa seca y agua. El filtro transforma los valores de 0 o 1 a su contrario si, en los pixeles a su alrededor, presentan más de 3 valores distintos a sí mismo usando una conectividad 4. Esto se aplica de forma iterativa hasta que la imagen obtenida no cambia respecto a la imagen previa o hasta que se alcanzan 20 iteraciones. De este modo se vuelven más homogéneas las regiones de playa seca y playa húmeda, sin afectar la formas de los límites (línea de costa) que es lo que verdaderamente nos interesa.

5.3.5.1 Matriz de bordes Media HS, Media HSV, HS-Otsu

Posterior a este filtrado se genera una matriz de bordes asignándole valor de 1 a los cambios de playa seca a playa húmeda a lo largo de cada columna, quedando todo lo demás con valor de 0. Así se generar tres matrices de bordes, una para cada método.

5.3.5.2 Obtención de bordes usando el método Canny y LoG

Aunado a las tres matrices obtenidas basadas en la obtención de umbrales del color y brillo, se generaron dos más utilizando métodos predefinidos en el procesamiento digital de imágenes para obtener bordes. Los métodos elegidos fueron Canny y LoG al ser considerados en la literatura los más consistentes, y los que arrojan menos falsos positivos. Ambos métodos fueron aplicados sobre las mismas ROI descritas pero usando solamente la información de la matriz de brillo.

6.3.6 Extracción de línea de costa

Una vez obtenidas las matrices de bordes, es necesario identificar cuál de los bordes corresponde a la línea de costa. Para esto se recorre las columnas de la matriz de izquierda a derecha hasta encontrar una línea (valor de 1) que sirve como punto inicial, si existen varias se eligen todas. De cada valor inicial se identifica el siguiente valor igual a 1 de la siguiente columna que se encuentre más próximo, repitiendo esto a lo largo de la imagen. Ya detectadas las posibles líneas de costa, se determina la línea correcta como la que presenta menor distancia entre los puntos que la componen. Ya que la línea de costa es continua a lo largo de la región de interés, las demás líneas encontradas en la imagen que corresponden a otros elementos suelen tener mayores distancias entre sus puntos.

Se obtuvieron líneas de costa a partir de 5 matrices de bordes obtenidas con métodos distintos: tres obtenidas con el método propuesto en este trabajo (Umbral Media HS, Umbral Media HSV, Umbral HS-Otsu); y dos de los métodos clásicos de detección de bordes (el método LoG y el método Canny).

6.3.7 Selección de la línea de costa

Para elegir la línea que mejor representa la línea de costa del conjunto de 5 líneas obtenidas en el paso anterior, se escribió un programa basado en Matlab que permite realizar una selección visual de la línea de costa que mejor se ajuste para cada imagen. El programa visualiza cada imagen de exposición temporal oblicua y grafica las líneas de costa sobre las imágenes. Pregunta al usuario que línea de los cinco métodos debe elegir y aplica un suavizado de media móvil con un tamaño de ventana de cinco pixeles a la línea elegida. Posteriormente pregunta al usuario si desea editar la línea, dando la opción de interpolar segmentos seleccionados por el usuario que presentan fallos en la detección. Durante el procedimiento se puede descartar la línea de costa si esta no se ajusta de manera aceptable para el observador. A la línea resultante del proceso la llamamos Línea de Costa Elegida (LCE).

6.4 Obtención de alturas

Las alturas de la marea se obtuvieron del mareógrafo de la UNAM instalado en el puerto de abrigo de Sisal (figura 15). Las mediciones del mareógrafo se tienen cada 10 minutos. Se cuenta con registro de mediciones desde agosto del 2013 hasta agosto del 2015. Estas mediciones son promediadas para obtener un valor de nivel medio del mar (NMM). Este nivel se le resta a la serie de datos de alturas de marea para referir la elevación con respecto al NMM. Mediante un proceso automatizado se identifica la fecha de las imágenes analizadas y se busca el valor de la altura de la marea de una base de datos para el mismo tiempo dado. El valor de marea entre el minuto 0 y 10 de la hora es promediado, ya que es el tiempo durante el cual la cámara toma imágenes para crear la imagen de exposición temporal. El valor de la marea promediado es asumido como la altura de la línea de costa para esa hora.



Figura 15. Estación mareográfica de la UNAM ubicado en el puerto de abrigo de Sisal.

6.5 Rectificación línea de costa

Las LCE se obtienen de imágenes oblicuas por lo que posteriormente fueron transformadas a coordenadas reales en vista de planta utilizando los resultados obtenidos para la calibración intrínseca y extrínseca de las imágenes y usando como valor de elevación la altura de la marea en esa hora. De esta manera es posible cuantificar en metros su posición, elevación y variación. Las LCE rectificadas obtenidas para cada cámara durante la misma hora se unen en una sola línea. En las zonas donde se traslapan las cámaras pueden presentarse variaciones en la detección de LCE entre cámaras y observarse dos líneas de costa o un salto entre ellas. Para evitar esto, la LCE en las zonas que se traslapan y presentan detección por ambas cámaras son suavizadas usando una media móvil.

6.6 Generación de modelos de elevación

Las líneas de costa rectificadas y con valores de marea asignados son importadas como puntos X Y Z al programa ArcGis. Los puntos son transformados a shapefile y después transformados a raster utilizando la herramienta interpolación “De Topo a Raster”. Esta herramienta basada en el programa ANUDEM (Hutchinson, 1989) está diseñada específicamente para crear modelos digitales de elevación hidrológicamente correctos, en el que: “los ríos y torrentes marquen cambios de pendiente, los lagos tengan altitud constante y las divisorias de aguas aparezcan claras” (Errea-Abad, 1999; ESRI, 2012).

6.7 Validación

6.7.1 Selección de días

Para corroborar el funcionamiento del modelo de elevación se requiere observar un considerable cambio en la altura de la marea dado el régimen de mareas en la zona. Por este motivo se trabajó con los días de mayor variación de la altura de la marea durante las horas de captura de las cámaras. Para identificar dos días y evaluar tanto el flujo y reflujo de la marea se descargaron los datos de predicción de mareas para puerto Progreso que genera el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California (CICESE) para el periodo que abarca agosto 2013 a agosto 2014. Se identificaron 10 días cuya amplitud fuera la mayor para el flujo de la marea y 10 más para el reflujo entre las 1100 horas UTC y las 2330 horas UTC, que es el horario de captura de las imágenes. En los días de mayor variación se revisó si existen imágenes disponibles para todas las cámaras, y que las condiciones climáticas fueran adecuadas para la identificación de la línea de costa, además de que no hubiera presencia de sargazo en la mayor parte de la línea de costa.

6.7.2 Evaluación de detección de línea de costa

Para evaluar el error cometido con los métodos de detección automatizada respecto a la detección manual de la línea de costa, para ambos días se digitalizaron visualmente por un usuario líneas de costa de las imágenes oblicuas identificando a criterio del usuario la interface entre mar y tierra, y seleccionando puntos a lo largo de la imagen. Los valores intermedios entre cada punto son interpolados para dar una línea continua. Se calculó las diferencias entre las líneas de costa digitalizadas manualmente (LCd) y las obtenidas por los 5 métodos, así como la LCE. De las diferencias se obtuvo el error cuadrático medio (ECM) como estimador del ajuste entre LCd y las obtenidas de manera automatizada.

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d^2}{n}}$$

Dónde: d = la diferencia entre la LCd y las detectadas.

n= número de elementos comparados

6.7.3 Evaluación de la posición de la línea de costa

El día 14 de octubre del 2014 se midió la línea de costa utilizando un GPS diferencial Magellan, para evaluar la detección de la línea de costa con respecto a la ubicación de la línea de costa observable en campo. Se caminó a lo largo de la costa tratando de ir por donde llegaban la mayoría de las olas más altas. Se obtuvo la LCE para este día a la hora del levantamiento topográfico, 19:30 UTC, y se rectificó para poder comparar la diferencia de detección en metros de la LCE y la intersección mar y tierra observada en campo.

6.7.4 Evaluación del modelo de elevación

Para validar la generación de MDE se utilizó un levantamiento topográfico realizado el 01 de julio del 2015. Se obtuvieron las líneas de costa para ese día, y se generó el MDE de la forma descrita anteriormente. Se compararon perfiles perpendiculares a la costa obtenidos del MDE y los perfiles obtenidos de la topografía.

RESULTADOS

7.1 Calibración de imágenes

7.1.1 Calibración intrínseca

Se obtuvieron los parámetros intrínsecos para cada cámara los cuales permiten eliminar de manera correcta la distorsión debido al lente. En la figura 16 se puede observar un ejemplo de una imagen de la cámara 2 en la cual se aplicó un programa para eliminar la distorsión utilizando los parámetros obtenidos. El horizonte, que pierde su curvatura tras la calibración extrínseca, es la sección de la imagen donde mejor puede observarse el efecto de eliminar la distorsión.

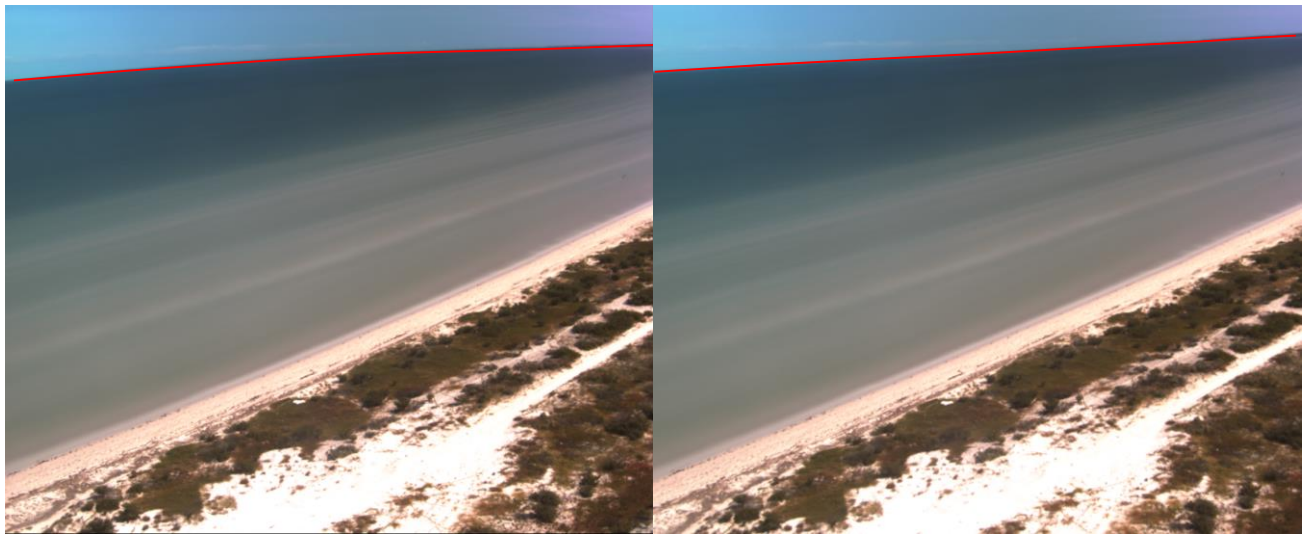


Figura 16. La imagen izquierda es una imagen de exposición temporal de la cámara dos. La imagen derecha es la misma imagen después de eliminar distorsión. En ambas imágenes se trazó de rojo el horizonte para resaltar el efecto de la distorsión de la lente.

7.1.2 Extrínseca

La calibración extrínseca necesita conocer la posición de las cámaras y de una serie de puntos de control en tierra que sean visibles desde las cámaras y estén repartidos por el campo de visión de las mismas. Las coordenadas de los puntos de control utilizados se presentan en la tabla 2 y la figura 17. De los puntos de control, uno comprende una esquina del muelle de Sisal (PC 1), otro es un palo enterrado en la parte de la playa sumergida (PC 2 en el 2015), el cual está presente desde que se tienen imágenes, dos son postes que forman parte del perímetro de la Unidad Académica Sisal (UAS) (PC 13 y 14 en el 2015), y otro es una esquina del faro de la escollera (PC 14 en el 2015). Los puntos restantes son una serie de postes pintados de naranja y colocados en la playa con el propósito de funcionar como puntos de control. Algunos ejemplos de cómo se observan los puntos de control desde las cámaras se presentan la figura 18. Para la instalación de los puntos de control se realizaron dos campañas, en 2013 y 2015. La campaña de 2015 fue necesaria porque, por agentes externos a la investigación, determinados puntos de control habían sido destruidos o desaparecidos. En la tabla 2 se denota con un número cuales puntos fueron medidos en cada año, los marcados en la columna 2015 como removidos son los postes faltantes, mientras que los que se marcan en la columna del 2013 como “no corresponde” son los puntos de control que se replantearon. Los últimos cinco puntos de control de la tabla se hicieron en la última campaña y fueron realizados para solucionar un problema de calibración con la cámara 1 y 2.

A diferencia de la calibración intrínseca, que sólo depende de las características de la lente y la cámara, la calibración extrínseca debe repetirse cada cierto tiempo, porque los pequeños cambios en la posición o la orientación de las cámaras causan cambios considerables en su campo de visión y, por tanto, en la calibración. Para esto, es necesario observar de nuevo la ubicación de los puntos de control en la imagen (u, v) y cambiar los parámetros de entrada en el programa que los resuelve.

Tabla 2 Posición geográfica y altura ortométrica de los puntos de control medidos en tierra durante las campañas del 2013 y 2015. Los puntos de control marcados con una R son los puntos de control que fueron “removidos” antes de las campañas del 2015. Los puntos de control marcados con NC son puntos de control que se añadieron en las campañas del 2015, por lo que “no corresponden” con algún punto de control medido en el 2013.

2013	2015	Este	Norte	Altura
1	1	808198.253	2343647.352	1.71
3	R	807079.351	2343282.979	2.20
4	R	807098.443	2343320.844	1.93
5	R	806984.841	2343282.437	2.59
6	R	806937.991	2343318.179	1.32
7	R	806867.273	2343286.773	1.97
8	R	806893.856	2343293.490	2.60
9	R	806901.394	2343318.355	1.37
10	R	806820.047	2343282.716	1.97
12	R	806790.558	2343319.273	1.31
13	5	806763.761	2343310.377	1.89
14	7	806735.177	2343321.720	2.08
15	6	806740.309	2343308.704	1.73
16	8	806706.804	2343321.436	1.99
17	9	806687.983	2343309.541	1.67
19	10	806667.772	2343309.504	1.68
20	11	806636.195	2343318.224	1.72
21	12	806644.681	2343272.296	2.77
23	13	806583.363	2343279.049	3.03
24	14	806442.042	2343387.566	1.72
NC	3	807073.820	2343312.075	2.18
NC	4	806813.835	2343297.561	1.72
Palo en el mar	2	807078.219	2343366.892	0.07
NC	15	806949.123	2343323.554	1.88
NC	16	806853.607	2343322.336	1.79
NC	17	806842.434	2343325.871	1.62
NC	18	806842.353	2343324.743	1.77
NC	19	806792.166	2343301.630	1.82

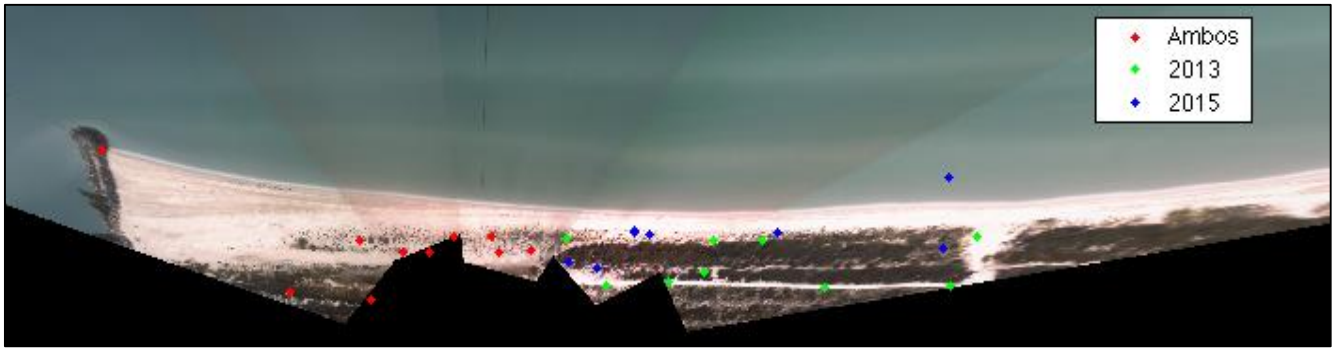


Figura 17. Puntos de control utilizados para realizar la calibración extrínseca de las 5 cámaras. En rojo se muestran los puntos medidos en ambas campañas, en verde los medidos en el 2013 y en azul los medidos en el 2015, el punto uno no se observa ya que la esquina del muelle queda fuera de la imagen en vista en planta.



Figura 18. Ejemplo de puntos de control vistos desde las imágenes generadas por las cámaras.

7.1.3 Rectificación a vistas en planta

Utilizando los resultados de la calibración intrínseca y las calibraciones extrínsecas, se generaron imágenes de la vista en planta de la playa a una resolución de 2 píxeles por metro (0.5 m/píxel) (figura 19). Esta resolución se consideró la ideal ya que una mayor resolución implica un mayor costo computacional, y al hacerlo más bajo, se pierde información de la morfología.

A diferencia de las imágenes oblicuas, los píxeles de las imágenes en vista de planta tienen una medida constante a lo largo de la imagen y sus coordenadas son conocidas. Por esa razón estas imágenes son las utilizadas para tomar mediciones que tengan relación con la realidad. Sin embargo, utilizar las imágenes en vista de planta para detectar la línea de costa presenta dos limitaciones: al fijar la resolución espacial de la imagen a un valor dado, se pierde resolución con respecto a la imagen oblicua y; los distintos grados de exposición de luz, agua o polvo de cada cámara, hacen que la iluminación de cada imagen tenga variaciones considerables, en una sola imagen, lo que provoca que las imágenes en vista de planta pueda presentar "saltos" en la iluminación entre secciones de playa.

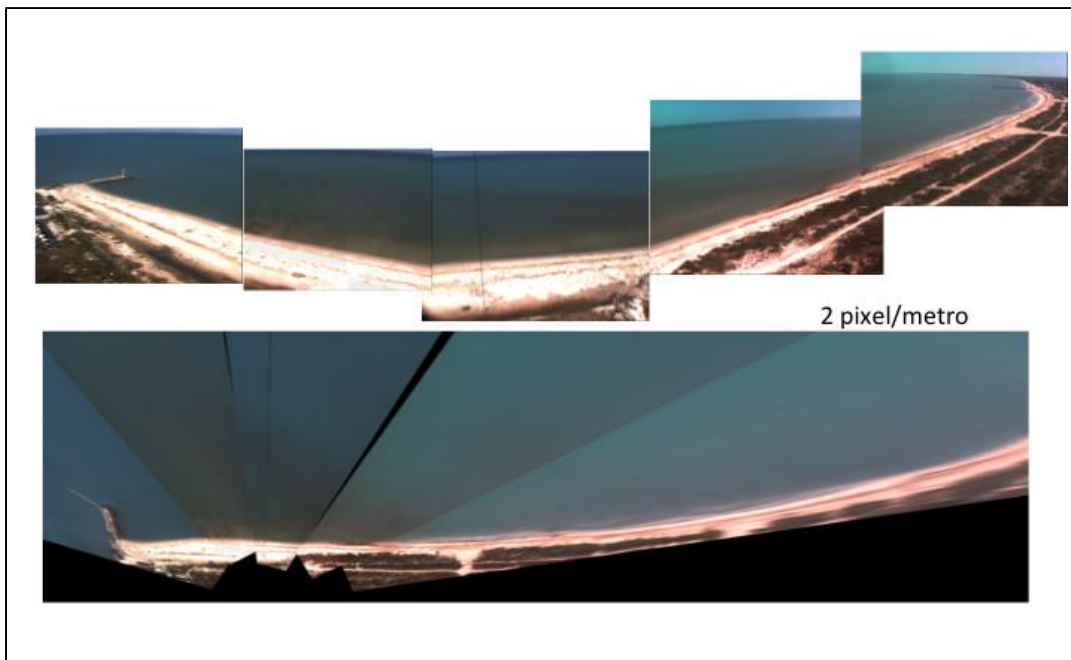


Figura 19. Transformación de imágenes oblicuas de las 5 cámaras, a una imagen en vista de planta. La imagen resultante tiene una resolución de 2 píxel/metro.

Debido a lo anterior, los métodos conocidos de extracción de línea de costa trabajan con las imágenes oblicuas y también se decidió aplicar los algoritmos de detección de la línea de costa directamente sobre las imágenes de exposición temporal oblicuas de cada cámara. Los resultados obtenidos fueron posteriormente transformados a coordenadas reales, utilizando los mismos parámetros que se utilizan para rectificar y transformar las imágenes.

7.2 Detección de línea de costa

En la siguiente sección se presentan y analizan los productos generados por las subrutinas que extraen las líneas de costa de las imágenes con los 5 métodos: HS-Media, HSV-Media, HSV-Otsu, LoG y Canny. Este proceso corre de manera automatizada y es sólo hasta la selección de la línea, que se describe en el apartado 6.3.7, que se requiere intervención del usuario.

7.2.1 Extracción de ROI

Las ROI seleccionadas para cada cámara cumplen con las cuatro necesidades planteadas en la metodología: representar bien las secciones de mar y playa; que la línea de costa siempre este dentro de la región; evitar ruidos innecesarios para el procesado; y disminuir el cálculo computacional al disminuir el tamaño de la matriz. La figura 20 muestra el área que corresponde a la ROI de la cámara uno, formada por rectas perpendiculares a una línea perpendicular a la costa. La ROI de las 5 cámaras puede observarse en la figura 21. Para las ROI de la cámara 3 y 5 se tomaron en cuenta, además, otras consideraciones especiales debido a sus características particulares. Dentro del campo de visión de la cámara 3, se observa uno de los cables que sirven para tensar la torre meteorológica. Este cable puede provocar problemas en los algoritmos de detección de línea de costa, así que para evitarlos, se recortan las columnas de la imagen en la que se observa el cable, este recorte no afecta a la detección pues se trata de solamente unas 10 columnas que corresponden a menos de 1 m de playa. En cuanto a la cámara 5, debido a que algunos de los procedimientos del algoritmo de detección recorren la

imagen de izquierda a derecha, la escollera puede provocar que falle la detección. Esto se solucionó con rotar horizontalmente las posiciones de los píxeles de la ROI de modo que la escollera quede del lado derecho de la imagen.

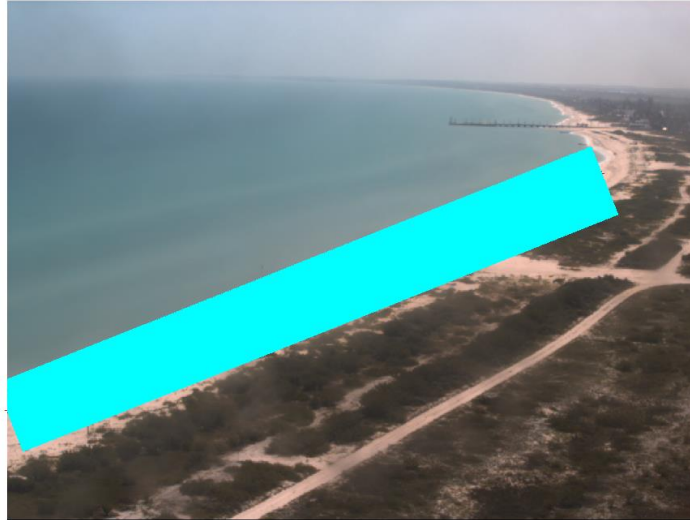


Figura 20. Imagen oblicua de la cámara 1 donde se observa en cian el área que cubre la ROI.

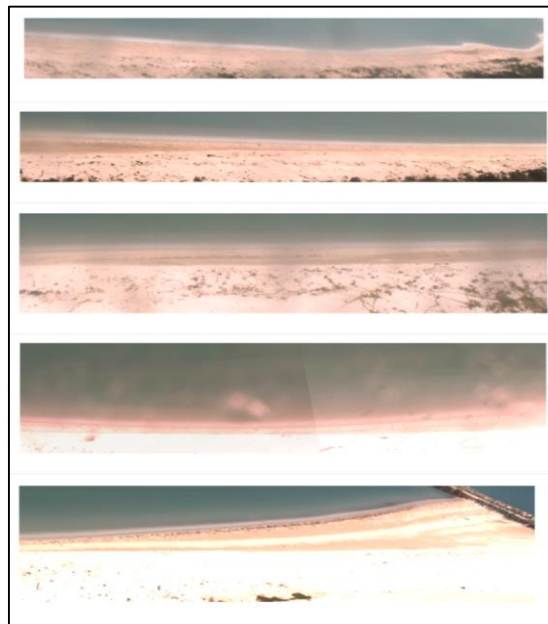


Figura 21. ROI de las cinco cámaras. La imagen superior corresponde a la cámara uno y así sucesivamente.

7.2.2 Transformación de RGB a HSV

En la figura 22 se muestra un ejemplo de transformar los valores de la imagen de RGB a HSV. La imagen de arriba es la ROI de la cámara uno presentada en RGB de las 1600 horas UTC del día 12 de julio del 2014. La imagen inferior es la misma después de transformarla al modelo de color HSV y proyectar cada matriz en los canales RGB. Es decir, la matriz que corresponde al matiz se proyecta en el canal rojo, la de saturación en el verde y la de brillo en el azul, dando como resultado que las áreas de alto brillo se vean azules. Además de que se observa un marcado contraste entre el agua y la tierra debido a sus distintas tonalidades. La playa tiene un tono más cercano al rojo (cómo se observa en la imagen en RGB) por lo tanto bajo valor de matiz mientras el agua que tiene tonalidades entre azules y verdes tienen valores de matiz medios.



Figura 22. Transformación de imagen en el modelo RGB a HSV.

7.2.3 Filtrado y re- escalado

En la figura 23 se presenta el histograma del matiz y la saturación correspondiente a la imagen de la figura 22, antes de realizar el proceso de filtrado de valores extremos y re- escalado al dominio 0 a 1 y después. Puede observarse como los pixeles de la imagen que corresponden a agua y a la playa seca se agrupan en regiones opuestas y como el proceso hace más evidente esta separación.

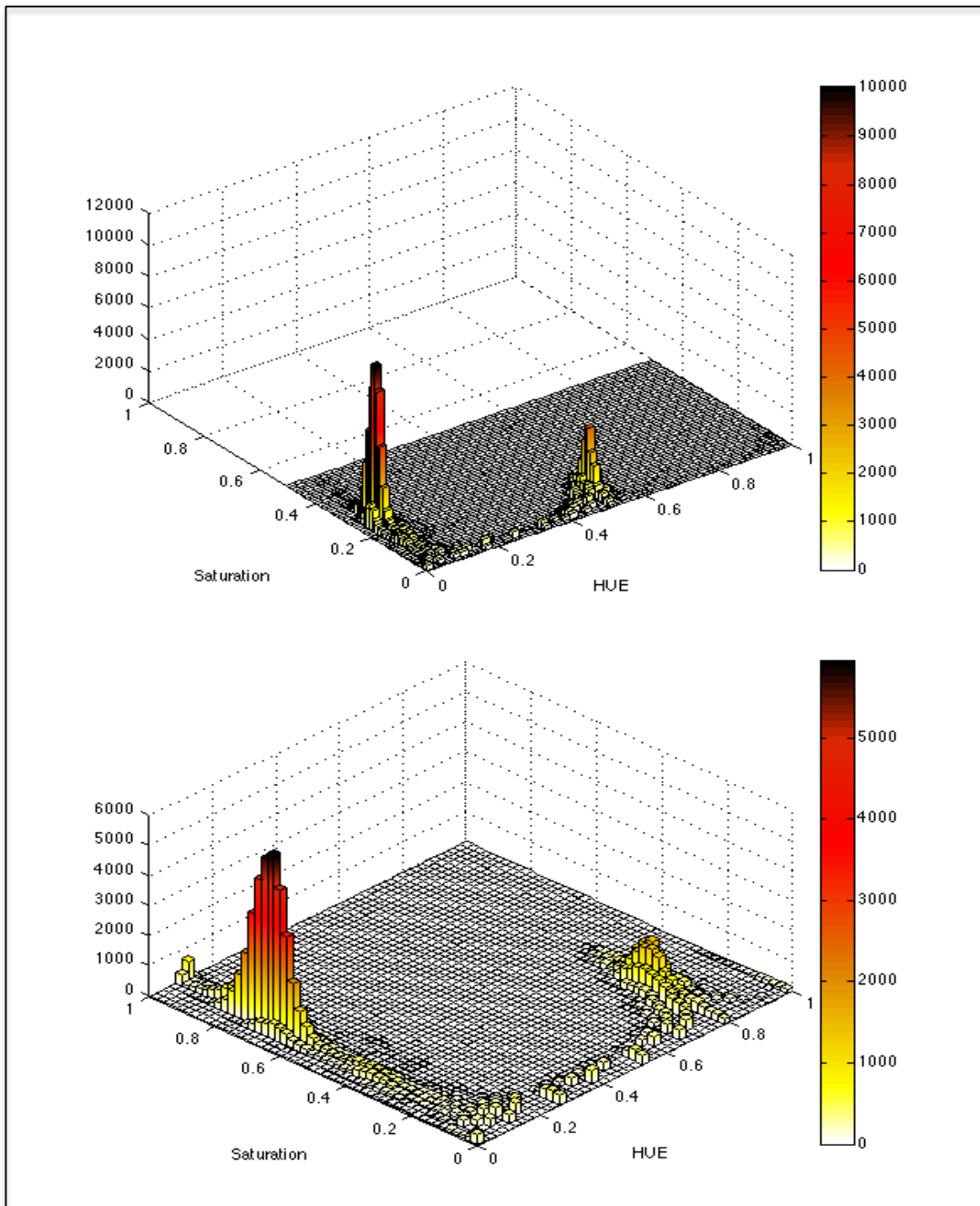


Figura 23. Histograma de dos dimensiones del matiz y la saturación de la imagen de las 1600 UTC del 12 de julio del 2014 de la cámara uno donde se muestra el efecto del filtrado y re escalado. El histograma superior es antes del proceso y el inferior después.

7.2.4 Obtención de umbrales

Con las matrices H y S clasificadas en valores de 0 y 1 se puede observar un patrón donde los valores de la arena tienden a ser menores al umbral en el matiz y mayores en la saturación, así mismo la vegetación y el sargazo (alga parda que arriba a las costas de Sisal). En la figura 24 se observa la imagen de la cámara 1 a las 1600 horas, donde se presenta en colores las combinaciones que se obtienen al representar la matriz H y S binarizadas. En verde se representa la playa seca. Las demás combinaciones de valores se representan en rojo, amarillo (no presente) y negro y corresponden al agua o playa húmeda.



Figura 24. Imagen compuesta por las matrices binarias de H y S obtenidas mediante un valor umbral para la cámara uno.

En la figura 25 se presentan tres imágenes de la ROI de la cámara uno en RGB (1) a las 1600 (A) 1900 (B) y 2200 (C) horas UTC, su correspondiente imagen en HSV (2) y las combinaciones entre las matrices HSV binarizadas (3). Se presentan con el fin de mostrar el efecto de la obtención de umbrales y la binarización de las matrices, así como su sensibilidad ante los cambios de iluminación. En las imágenes en RGB se observa que las imágenes presentan distintos grados de brillo, variación visible sobre todo en la arena, además se observan diferencias en la zona de swash. En las imágenes en HSV (2) la diferencia en la zona de swash es más evidente. Las imágenes binarizadas (3) muestran más colores con respecto a la presentada anteriormente en la figura 24 debido a la presencia de la matriz de brillo binarizada.

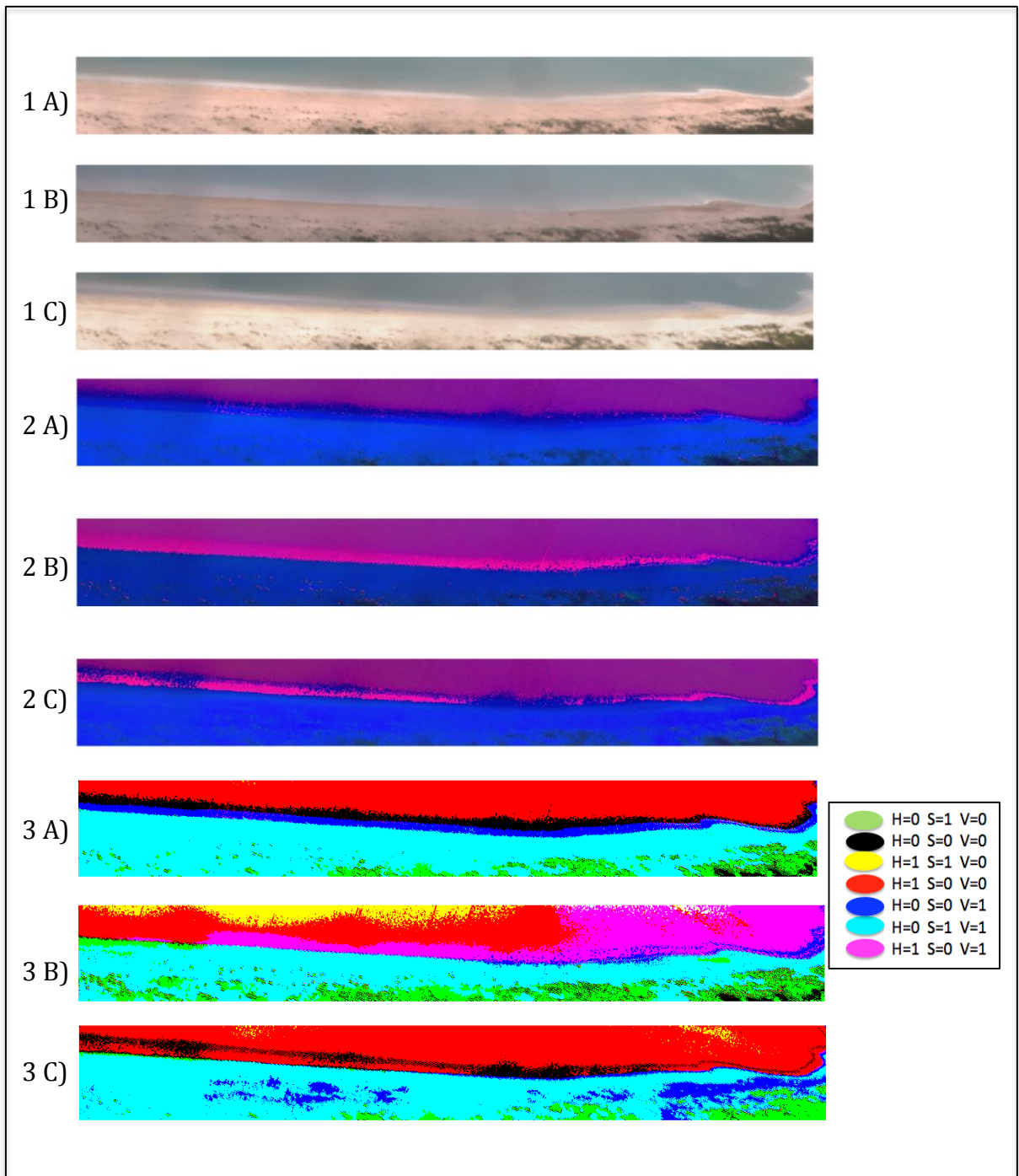


Figura 25. Imágenes de la ROI de la cámara uno de las 1600 (A) 1900 (B) y 2200 (C) horas UTC del 12 de julio del 2014. Con el numero 1 se denotan las imágenes en RGB, con 2 en HSV y 3 las imágenes despues de binarizar las matrices de H S y V. Cada color representa una combinación entre los valores binarios de las tres matrices.

La combinación $H=0$ $S=1$ y $V=1$, que se presenta en color cian, es la playa seca. Esta presenta un valor de brillo alto que contrasta con la vegetación que tiene menor brillo y usualmente se presenta en la combinación de color verde ($H=0$ $S=1$ $V=0$). En color azul se presentan las áreas claras y brillantes de las imágenes ($H=0$ $S=0$ $V=1$), como la zona de lavado de olas en la imagen de las 1600 (3A) o algunas regiones de la playa seca en la imagen de las 2200 (3C) en la cual la playa se observa mucho más clara y brillante.

Para el método que considera el brillo, (media HSV) la zona que se presenta en azul se clasifica como playa seca. Por lo tanto, este método arroja resultado distintos, al considerar la playa seca una región más grande. En los casos como el que se presenta figura 25 1C, esto resulta en una detección errónea de la línea de costa, al observarse el paso de playa seca a húmeda más hacia el mar, justo antes de la rotura del oleaje. Sin embargo, bajo ciertas condiciones de iluminación y oleaje, como los presentes en la figura 25 3C, el resultado arrojado por el método que considera el brillo se acerca más al esperado que si sólo se considera el H y la S.

El objetivo de binarizar cada matriz es definir la playa húmeda y playa seca. En la figura 26 se presenta la imagen binaria de las 1600 obtenida con el umbral HS-media: en blanco se observa la playa seca y en negro la playa húmeda. Se puede ver que se obtuvieron dos regiones bien definidas a lo largo de la imagen, con una pequeña parte mal clasificada en la esquina inferior derecha. Obtener una imagen así es lo ideal ya que es posible detectar una sola línea continua a lo largo de la imagen.



Figura 26. Ejemplo de la imagen binaria de las 1600 UTC del 12 de julio del 2014 definida por la playa seca =1 (blanco) y playa húmeda =0 (negra).

7.2.5 Matrices de bordes

Las cinco matrices de bordes obtenidas con los distintos métodos: A) Umbral HS-media, B) Umbral HSV-media, C) LoG, D) Canny y E) Umbral HS-Otsu se presentan en la figura 27. Se observan resultados muy similares entre las matrices obtenidas con los métodos HS-media, HSV-media y HS-Otsu en las cuales se presenta un sólo borde claro a lo largo de la imagen. El borde que se observa con el método HSV-media se presenta más hacia mar que los otros dos obtenidos con umbrales, como se explica en la sección anterior. El método LoG detecta muchos más bordes en la imagen sobre todo en la zona que corresponde a la playa seca, sin embargo la parte de playa húmeda suele ser más homogénea y se puede diferenciar del resto de la imagen.

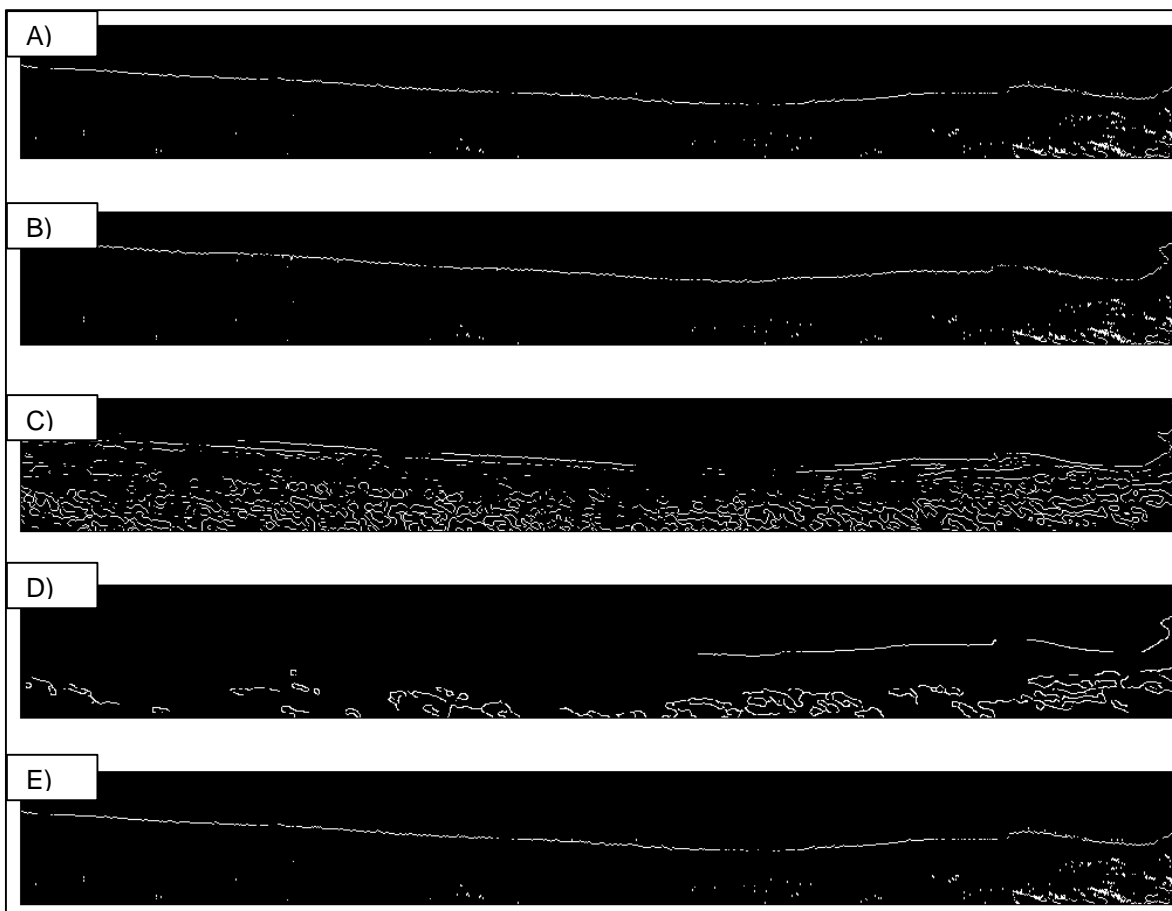


Figura 27. Matrices de bordes obtenidas con cinco métodos distintos para la imagen de las 1600 UTC de la cámara uno.

El método Canny detecta menos bordes que los demás métodos. Para imágenes con un buen contraste entre playa húmeda y playa seca, este método arroja buenos resultados, sin embargo si el contraste no es suficiente, o no es constante a lo largo de la imagen el método no encuentra bordes.

7.2.6 Extracción de línea de costa

A continuación se presenta como ejemplo en la figura 28 las líneas de costa que fueron detectadas utilizando las matrices de borde de la figura 27. La línea obtenida con HS-media (oculta) y HS-Otsu (magenta), que obtuvieron el mismo resultado, son las que mejor representan la línea de costa.

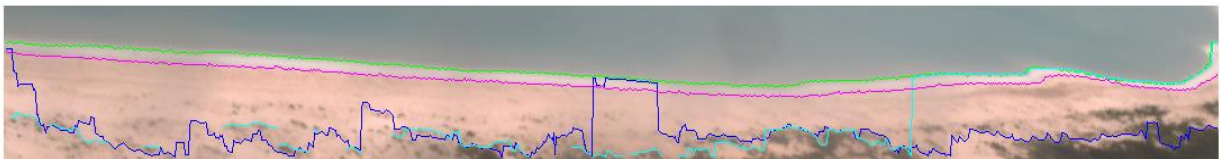


Figura 28. Imagen de la ROI de la cámara uno a las 1600 UTC del 12 de julio del 2014 con las líneas de costa extraídas de cada una de las matrices de bordes. En verde se presenta la obtenida con HSV-media, en azul la obtenida con LoG, en cian la que se obtuvo con Canny y en magenta la que se obtuvo con HS-Otsu.

La línea HSV-media (verde), como se ha observado anteriormente, encuentra la línea por atrás de la zona de rotura, y los otros dos métodos, LoG (azul) y Canny (cian) fallan al no presentarse una línea continua en las matrices de bordes.

En la figura 29 se muestra otro ejemplo de la detección de línea para una imagen de la cámara 5. En el ejemplo puede observar tres líneas: la obtenida con LoG (azul), con Canny (cian) y HS-Otsu (magenta). Las líneas HS-media y HSV-media no se perciben por que obtuvieron el mismo resultado que HS-Otsu. En este ejemplo el método que mejor detecta la línea de costa es Canny. En la misma figura abajo se muestran las matrices de bordes de las que se extrajeron las líneas que se observan. Se puede observar que en la matriz obtenida con LoG (B) y la matriz obtenida con HS-Otsu (D) detectan más bordes en la zona de rotura, es por esto que el método Canny que arroja menos bordes, funciona mejor.

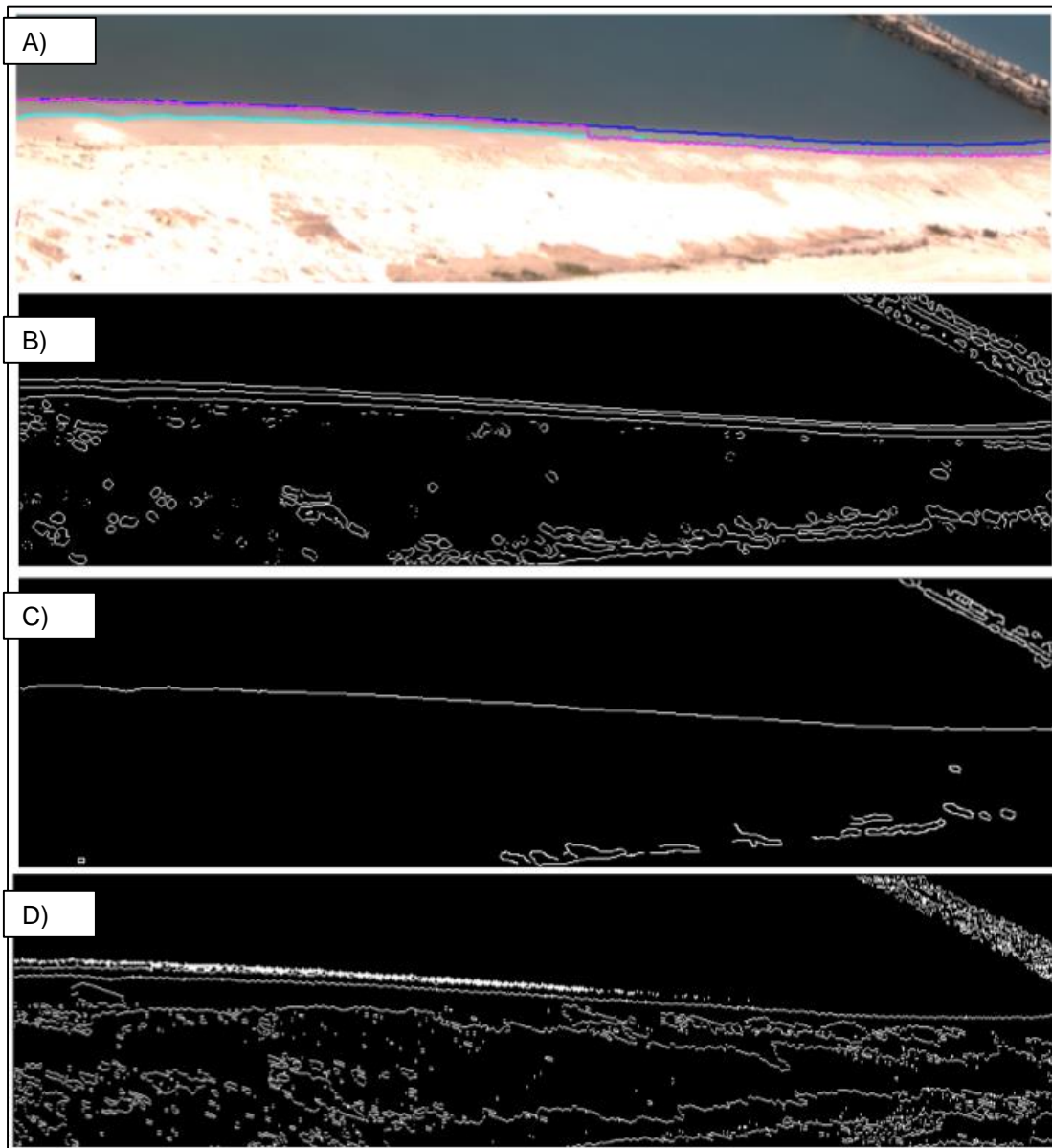


Figura 29. A) Imagen de la ROI de la cámara cinco del 27 de enero del 2014. Sobre la imagen se presentan las líneas de costa obtenidas con los cinco métodos, Sólo se observan tres: LoG en azul, Canny en cian y HS-Otsu en magenta. Las imágenes inferiores corresponden a las matrices de bordes obtenidas para esa imagen la B) es obtenida con LoG, C) con Canny, y D) HS-Otsu.

7.3 Selección de la línea de costa

En esta sección se presenta el programa diseñado para que el usuario seleccione una línea de costa de las cinco obtenidas con los distintos métodos. El programa presenta la imagen de exposición temporal oblicua que se desea analizar y grafica las líneas de costa sobre esta en diferentes colores para permitir distinguirlas, a cada línea a su vez se le asigna un número. La línea 1 azul es HS-media, 2 rojo HSV-media, 3 verde LoG, 4 cian Canny y 5 Amarillo HS-Otsu, como se observa en la figura 30. El usuario elige la línea que a su criterio sea la que mejor representa la línea de costa. En este ejemplo es la línea amarilla 5, del método HS-Otsu.

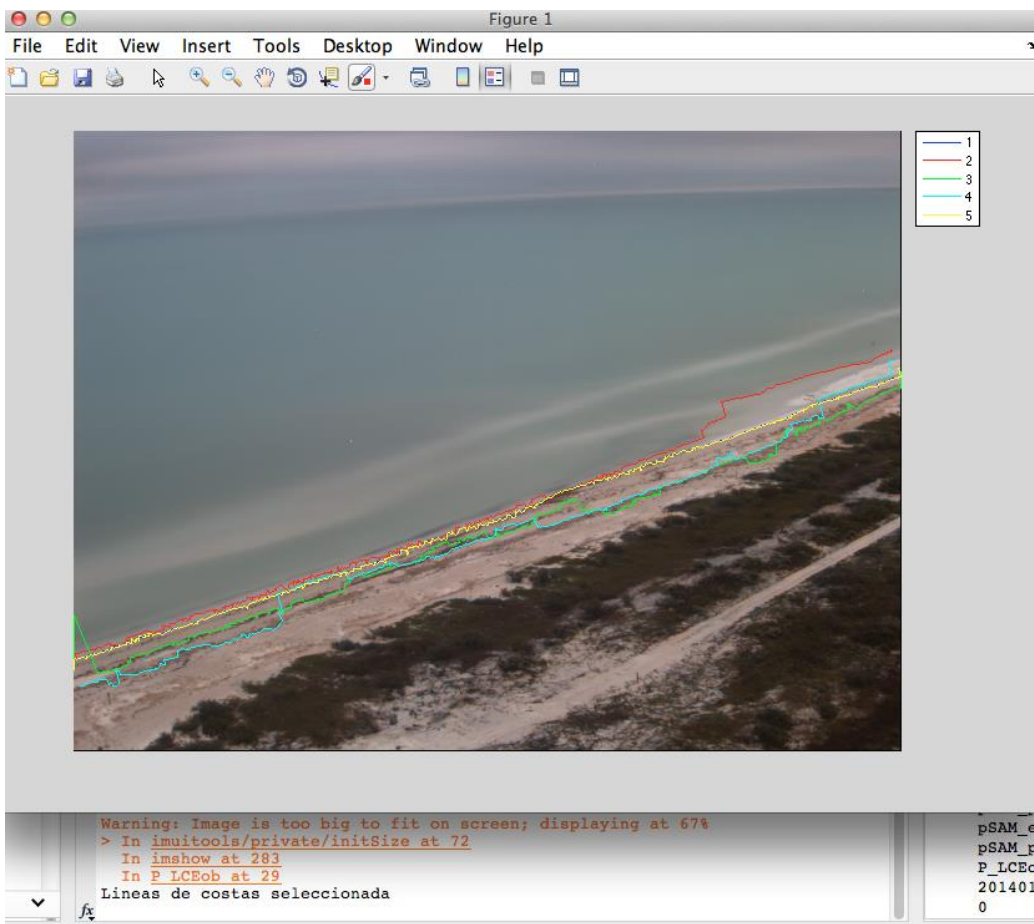


Figura 30. Recorte de pantalla donde se observa el programa basado en Matlab para elegir la línea de costa.

Al elegir una línea se abre una nueva ventana donde se visualiza la línea de costa elegida ya suavizada. Posteriormente el programa pregunta si desea corregir la línea, es decir entrar en modo edición. En el ejemplo mostrado en la figura 31, la línea presentada no requiere edición, así que se acepta y se guarda.

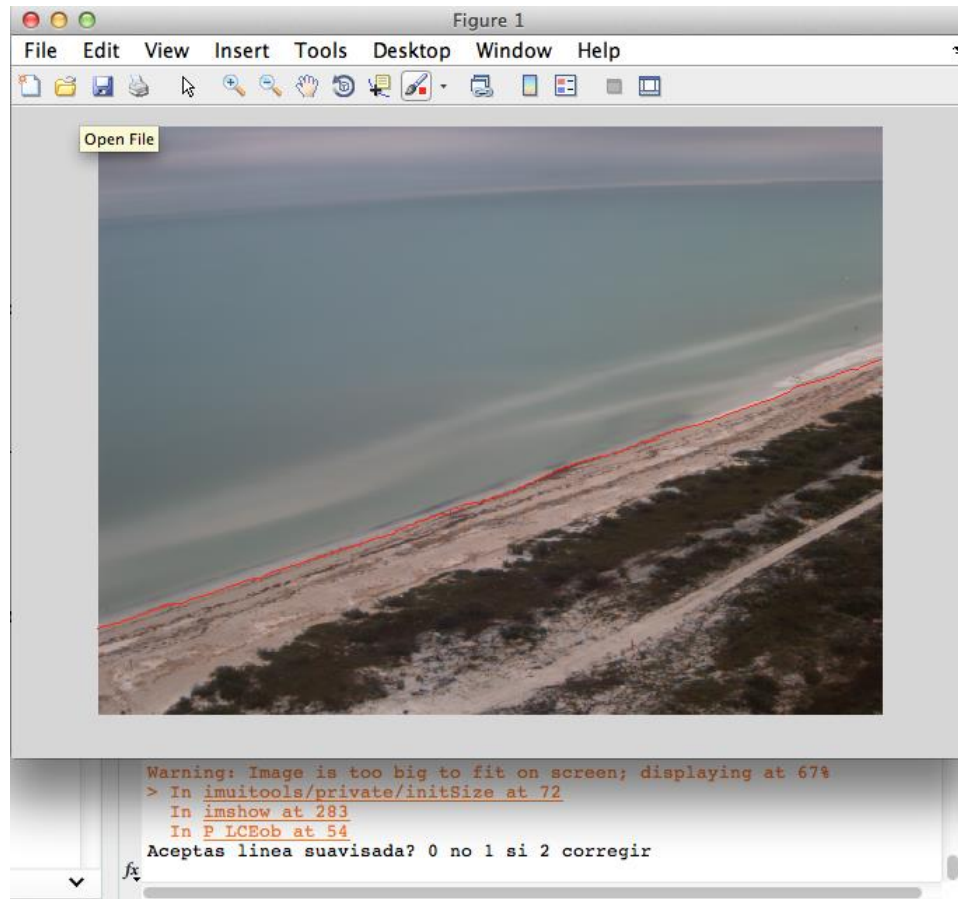


Figura 31. Recorte de pantalla del programa en el que se observa la línea de costa elegida y suavizada.

Un ejemplo donde la línea de costa requiere ser editada se presenta en la figura 32. La ventana permite hacer un acercamiento como se muestra en la imagen de la derecha. Después de ajustar la imagen a la zona que se desea corregir, se activa un cursor para elegir los puntos que formaran la línea de costa en la sección editada. Finalmente, se presenta la línea editada sobre la anterior y se le pregunta al usuario si desea aceptar, rechazar, o repetir.

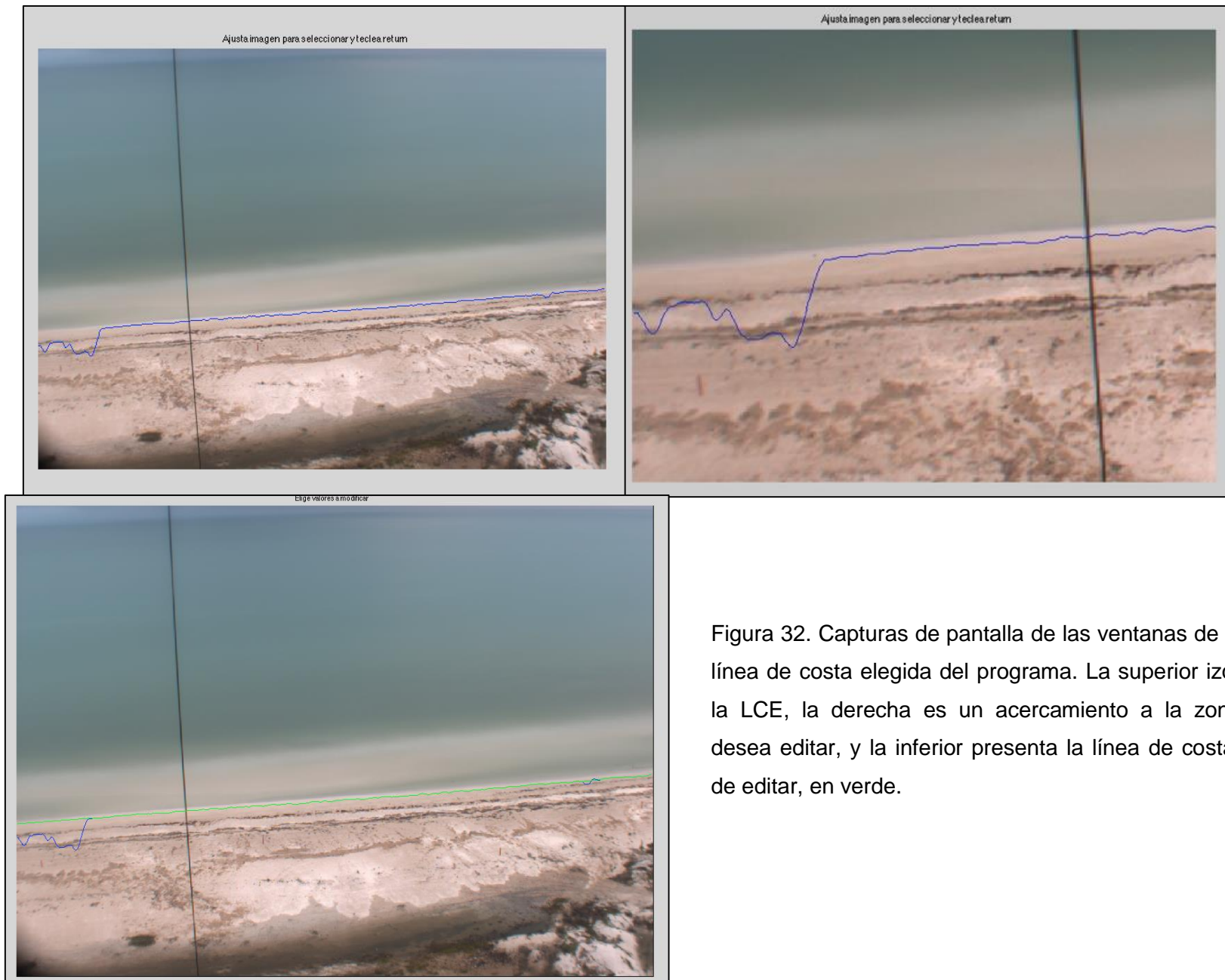


Figura 32. Capturas de pantalla de las ventanas de edición de línea de costa elegida del programa. La superior izquierda es la LCE, la derecha es un acercamiento a la zona que se desea editar, y la inferior presenta la línea de costa despues de editar, en verde.

7.4 Validación

7.4.1 Selección de días

De los 20 días elegidos se identificaron 9 días viables para realizar el modelo porque se cuenta con imágenes completas de todas las cámaras, baja presencia de sargazo en las imágenes y buena visibilidad (Tabla 3). Se eligieron dos días: 27 de enero del 2014 y 12 de julio del 2014, al ser los días donde hay más imágenes, se observaban mejor y para evaluar tanto en reflujo como en flujo.

Tabla 3. Días de mayor amplitud de marea astronómica durante el periodo de captura de las cámaras entre agosto del 2013 y agosto del 2014. La columna imágenes marca con 1 la existencia de imágenes para ese día, y con 0 el caso contrario. En la columna sargazo/clima se presenta con 1 la presencia de mal clima que no permite observar la playa así como alta presencia de vegetación acuática, con 0 la ausencia de ambas y N no aplica al no existir imágenes. La columna flujo/reflujo se marca con F si la marea en el tiempo de las cámaras está en flujo, y R si está en reflujo.

Año	Mes	Día	Amplitud(mm)	Imágenes	Sargazo/Clima	Flujo o Reflujo
2013	08	16	554	1	0	R
2013	08	17	602	0	N	R
2013	08	18	564	0	N	R
2013	08	19	475	1	0	R
2013	12	2	787	1	1	F
2013	12	3	817	1	1	F
2013	12	4	774	1	1	F
2013	12	30	788	0	N	F
2013	12	31	839	0	N	F
2014	01	1	823	0	N	F
2014	01	2	739	0	N	F
2014	01	27	710	1	0	F
2014	01	28	764	1	1	F
2014	01	29	759	1	0	F
2014	06	11	536	1	0	R
2014	06	12	548	1	0	R
2014	07	9	576	1	0	R
2014	07	10	615	0	N	R
2014	07	11	583	1	0	R
2014	07	12	559	1	0	R

7.4.2 Evaluación de detección de líneas de costa

Los ECM obtenidos de la diferencia entre la LCd y las líneas de costa obtenidas con los métodos HS, HSV, Log, Canny, HS-Otsu para cada hora de los días seleccionados se presentan en la figura 33 y figura 34. Además, se incluye el ECM obtenido para la diferencia entre LCd y la LCE. Es importante resaltar que, para estos ejemplos de la validación la LCE puede haber sido editada y mejorada por el usuario en el último paso del programa.

La escala está en logaritmo base 10 con la finalidad de observar con más detalle los errores pequeños pero sin perder de vista los errores muy grandes. Debido a esto hay que tener en cuenta que:

$$\log_{10}(1)=0, \log_{10}(3.162)=0.5, \log_{10}(10)=1 \text{ y } \log_{10}(100)=2.$$

Por lo tanto los valores en la gráfica entre 0 y 0.5 son buenas estimaciones, entre 0.5 y 1 son estimaciones aceptables, y estimaciones mayores a 1 son malas, tendiendo a peores conforme crece el valor.

Se puede observar que los errores de los métodos HS, HSV, HS-Otsu se comportan de manera muy similar, sin embargo el método HS-Otsu funciona mejor en la mayoría de los casos. Los métodos LoG y Canny presentan variaciones importantes con respecto a los otros 3, pero similar entre ellos. Para el primer evento los métodos Log y Canny presentan el mayor número de mejores estimaciones entre las 1700 y 2100 horas. En las cámaras 1, 2, 3 y 5, las estimaciones de los otros tres métodos mejoran cuando las estimaciones de LoG y Canny son malas, por lo que se complementan, habiendo estimaciones aceptables para casi todas la horas.

El segundo día (12-07-2014) el método que mejor funciona es HS-Otsu teniendo el menor ECM para la mayoría de las horas en las cámaras 1, 2, 3 y 5. El método Canny funcionó mejor en las primeras horas de la cámara 1, 2 y 3. En ambos días las líneas de costa obtenidas con los 5 métodos para la cámara 4 presentan grandes diferencias con respecto a las LCd ($ECM > 10$).

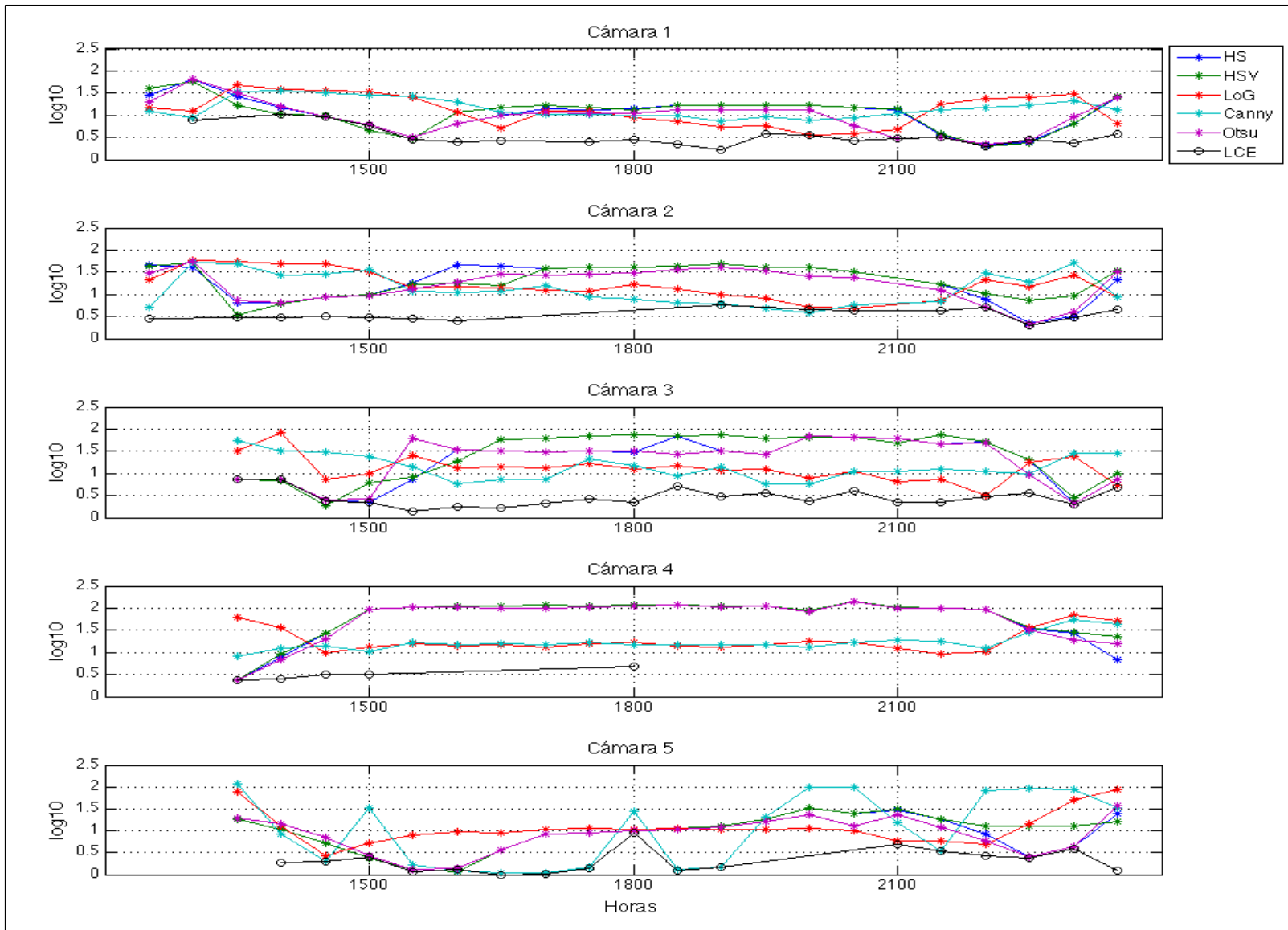


Figura 33. ECM de las diferencias entre la LCD y las obtenidas con los métodos HS, HSV, LoG, Canny, HS-Otsu y la LCE del día 27 de enero del 2014 para el horario de captura de las cámaras (UTC).

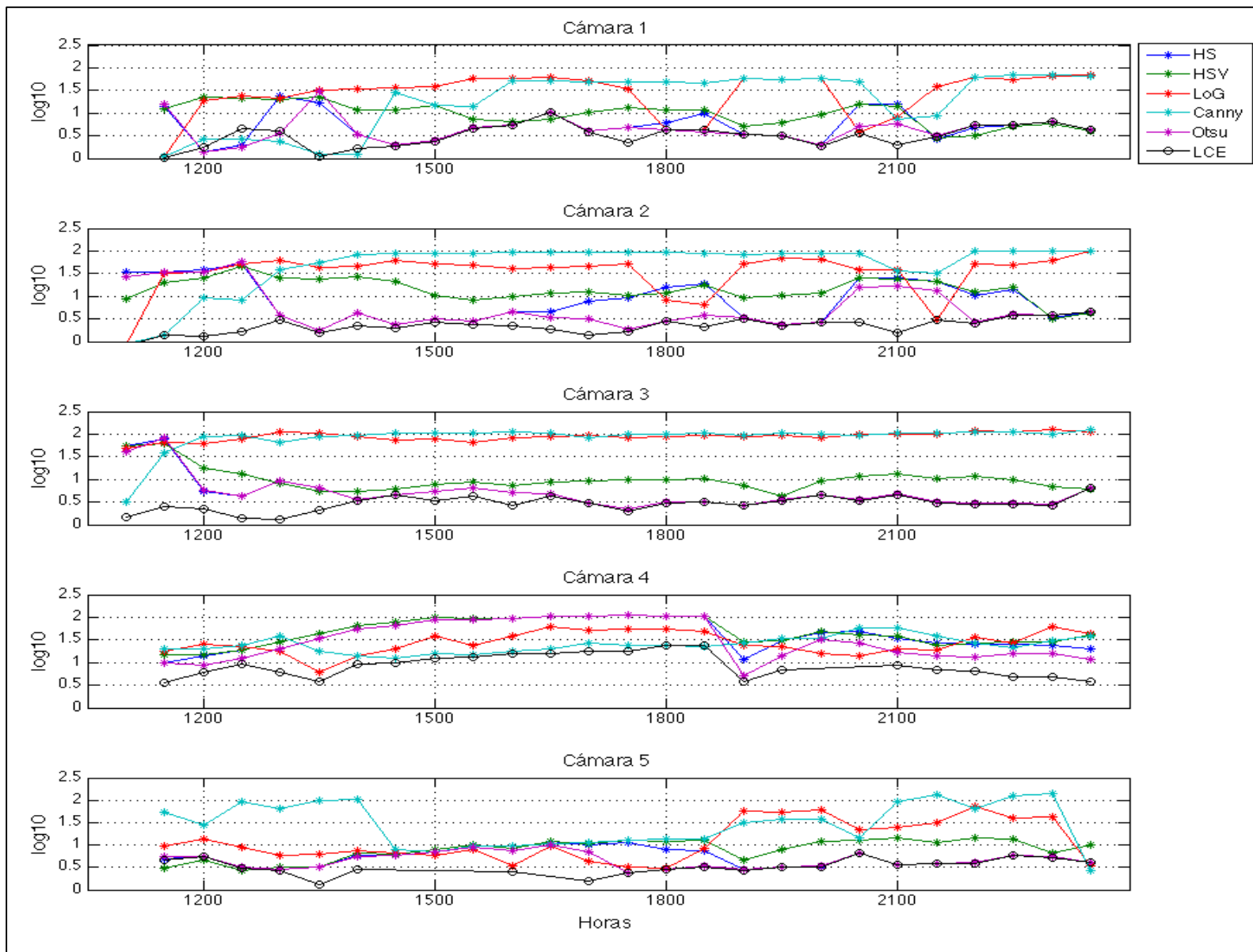


Figura 34. ECM de las diferencias entre la LCD y las obtenidas con los métodos HS, HSV, LoG, Canny, HS-Otsu y la LCE del día 12 de julio del 2014 para el horario de captura de las cámaras (UTC).

En la figura 35 se observa una imagen de la cámara 4 para el primer evento y en la figura 36 una imagen de la cámara 5 para el segundo evento. En la primera imagen se muestra un ejemplo donde ninguna de las líneas de costa obtenidas con los 5 métodos fue aceptada, ya que no representa bien la línea de costa. Claramente puede observarse que las detecciones consideradas malas ($ECM < 10$) encuentran elementos que no tienen nada que ver con la línea de costa o detectan la línea de rotura. La línea del método LoG está en el límite entre lo que sería una línea de costa aceptable (ECM cercano a 10), esta línea puede o no ser rescatada interpolando los valores que no corresponden a una detección adecuada, sin embargo para ese caso en particular se decidió que no era rescatable.



Figura 35. Imagen de exposición temporal y las líneas de costa obtenidas con los cinco métodos para la cámara 4.

En la figura 36 se presenta un ejemplo de una imagen de la cámara 5 donde se observa que la línea obtenida con el método HS-Otsu (magenta) es la que mejor representa la línea de costa. La línea azul (HS) no se observa ya que obtuvo el mismo resultado que el método HS-Otsu. Ambos métodos presentan ECM menores a 5 por lo que son buenas estimaciones, además no es necesario editarla, así que la LCE es igual a la detectada por el método HS-Otsu.



Figura 36. Imagen de exposición temporal y las líneas de costa obtenidas con los cinco métodos la cámara 5.

Al observar los valores de ECM promedio para cada cámara en píxeles y en metros obtenidas de la comparación entre las LCE y LCd rectificadas para cada día (Tabla 4), la LCE presenta estimaciones buenas y aceptables para ambos días. Se obtuvieron resultados para casi todas las imágenes exceptuando la cámara 4. En el primer evento, para dicha cámara, sólo hay 5 estimaciones. Esto

se debe a que cuando después del suavizado e interpolado ninguna línea de costa obtenida con los 5 métodos es aceptable no se obtiene una LCE. En el segundo evento hay LCE para la cámara 4 en casi todas la horas (23/25) pero las obtenidas entre las 14:30 y 18:30 son malas estimaciones por lo que el ECM promedio fue de 10.19/1.8 pixel/metros.

Tabla 4. Error cuadrático medio y numero de LCE comparada con el numero LCd.

Evento 01-27-2014					
Cámara	1	2	3	4	5
ECM pixel/metros	3.84/ 0.87	3.62/ 0.77	3.18/ 0.7	3.19/ 0.86	2.47/ 0.67
LCE/LCd	20/23	15/22	21/21	5/21	17/21
Evento 07-12-2014					
Cámara	1	2	3	4	5
ECM pixel/metros	3.67/ 0.88	2.34/ 0.56	3.123/ 0.7	10.19/ 1.8	3.55/ 1
LCE/LCd	25/25	26/26	26/26	23/25	21/25

Las estimaciones obtenidas con la LCE son bastante consistentes espacialmente. En la figura 37 se presentan los errores a lo largo de la costa de las comparaciones entre las LCE y LCd rectificadas para cada cámara para ambos eventos analizados. Se observa que la mayoría de los errores no sobrepasan los 2 metros de diferencia a lo largo de la costa, exceptuando la cámara 4. En la cámara 1 se observa una mayor dispersión de los errores por delante de los 150 m a lo largo de la costa, aproximadamente a 400 m de las cámaras, además de presentarse errores por encima de los 2 m llegando hasta los 4 m. Estos errores están relacionados con las diferencias de selección de líneas de costa entre la LCd y LCE ante un topografía compleja, como es la presencia de barras intermareales y por la perdida de resolución espacial en las imágenes oblicuas. La perdida de resolución puede notarse ya que los datos en vez de visualizarse como una línea continua se observan como puntos, esto puede observarse en la cámara 1 y 5, las más alejadas de las cámaras.

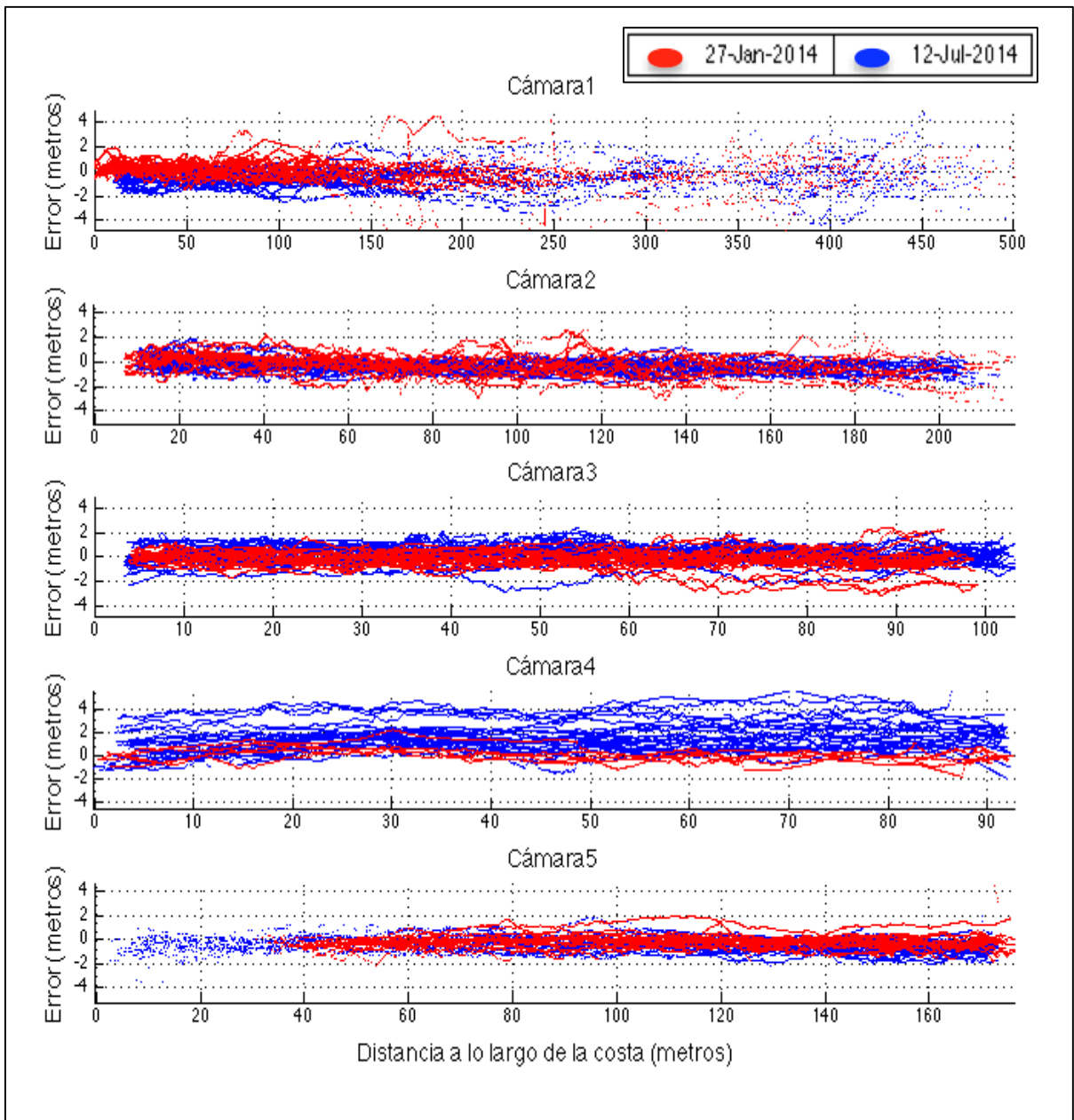


Figura 37. Diferencias entre la LCE rectificada y la LCd rectificada a lo largo de la costa para las 5 cámaras.

Una comparación a detalle entre las diferencias de la LCd y la LCE puede observarse en la primer imagen de la figura 38. En el caso de la cámara 4 puede verse que las LCE del segundo evento presentan grandes diferencias con respecto a la LCd. Estas diferencias son consistentes a lo largo de la costa llegando hasta 4 m. En la segunda imagen de la figura 38 se presenta un ejemplo de la cámara 4 para el segundo evento, la LCE fue la obtenida del método Canny. Si se observa a detalle puede notarse que el error en la cámara 4 puede ser debido a la sobreexposición a la luz, la orientación de la playa con respecto a la cámara, la transparencia del agua y las gotas de agua en la carcasa protectora. La orientación, la sobreexposición y transparencia del agua provocan que la playa y la zona de swash brillen en exceso, y no permite observar una diferencia entre la playa y la zona de swash en la matriz de brillo (figura 39). Esto sucede sobre todo en las horas de mayor intensidad solar por lo que los algoritmos LoG y Canny, encuentran bordes de la zona de swash hacia mar. Mientras tanto los métodos que se basan en la obtención de umbrales de la imagen en HSV fallan por el efecto que tiene la transparencia de la columna de agua en el color, donde predomina el color del fondo lo cual no permite encontrar diferencias marcadas en el matiz o la saturación en el paso de playa seca a playa húmeda, así que los métodos detectan líneas donde la columna de agua es más profunda y se observa una variación de color.



Figura 38. Imágenes oblicuas de la cámara uno y la cámara cuatro donde se muestra la LCd (azul) y la LCE (negro) de cada una.

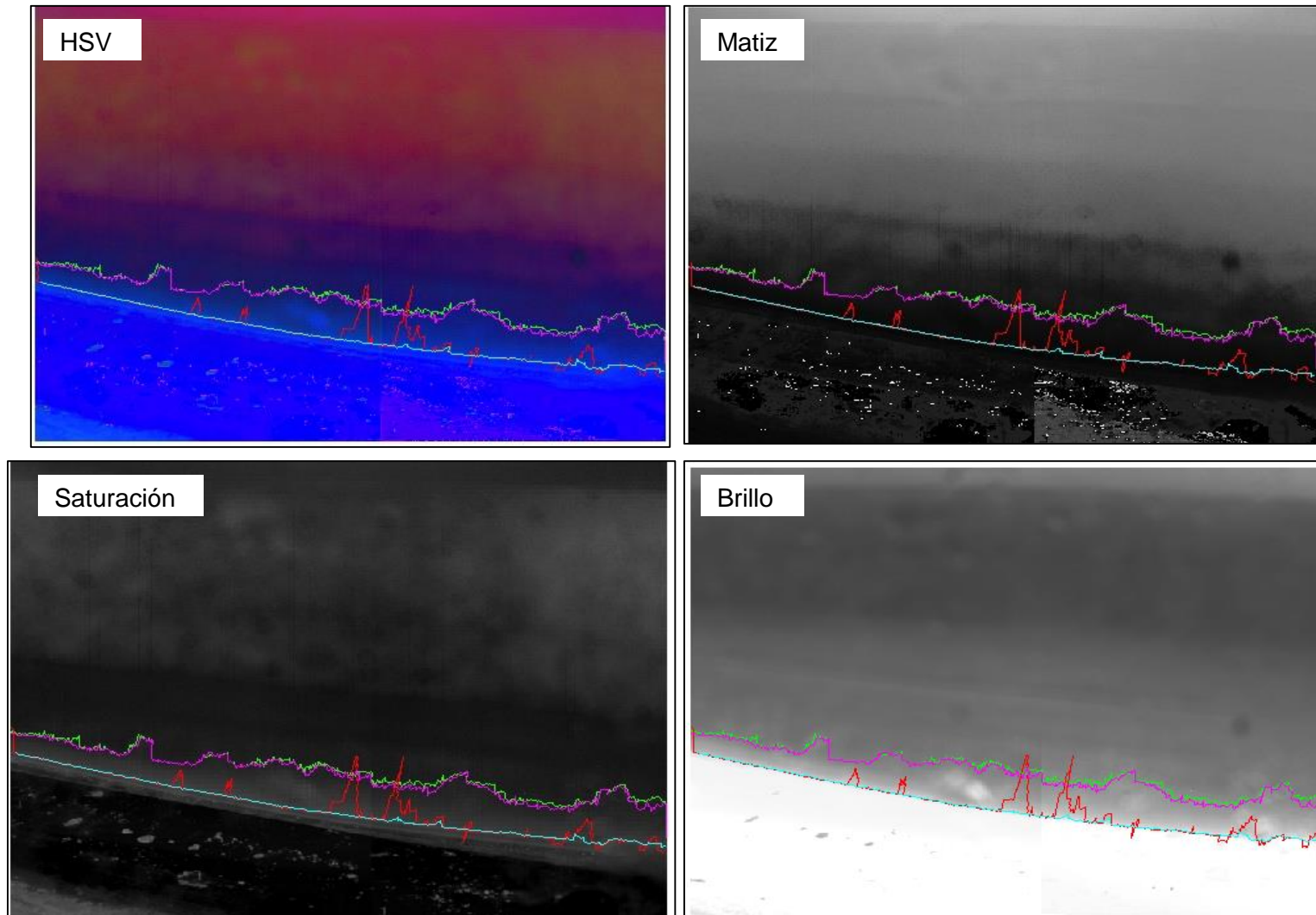


Figura 39. Imagen de la cámara 4 del día 12 de julio del 2014 a las 1530 UTC presentado la información de la imagen transformada al espacio de color HSV, Matiz, Saturación, y Brillo. Cada línea extraída con los métodos se presenta con un color: HS-media (azul), HSV-media (verde), LoG (rojo), Canny (cian), Otsu (magenta).

7.4.3 Obtención de altura

El primer evento presentó una amplitud de marea de 0.728 m entre las 11:00 y las 23:30 (figura 40). Este día la marea aumenta levemente hasta las 12:30, disminuye ligeramente la siguiente media hora para aumentar hasta las 20:30, hora a partir de la cual se mantiene la altura, incluso disminuye un poco. En la figura 41 se presentan las LCE obtenidas para la cámara 1 de este evento sobre una imagen de las 1300 UTC. Se observa la variación relacionada con altura de marea. Este evento presenta una gran amplitud de marea por lo que se puede observar claramente el desplazamiento de la línea de costa tierra adentro con forme transcurre el día, y sube la marea. La gran separación entre la línea de la primera hora y las demás es por la presencia de una barra intermareal, que queda al descubierto en marea baja.

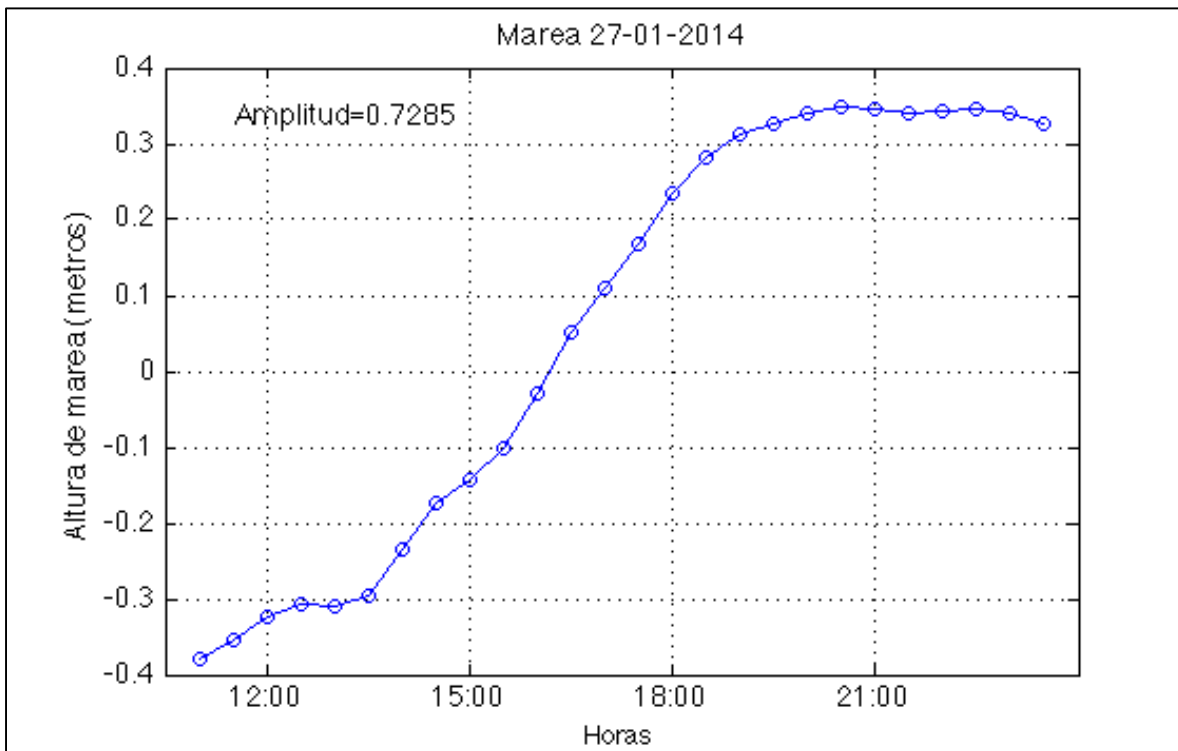


Figura 40. Variación de la marea obtenidas de mediciones del mareógrafo de Sisal Yucatán para el primer evento.



Figura 41. Imagen de exposición temporal de la cámara 1 y líneas de costa obtenidas durante un día presentado distintos colores dependiendo del horario en el que fueron obtenidas.

El segundo evento (figura 42) presenta una amplitud de 0.559 m. Se observa que a las 11:00 la marea tiene una altura de 0.13 m. La altura de la marea aumenta hasta casi llegar a 0.175 m a las 13:30 punto en el cual empieza descender hasta las 18:00. En este punto se alcanza un mínimo local con una altura de 0.03 m. Vuelve a aumentar la marea marcando otro máximo local a las 19:00 de 0.045. Se mantiene otra media hora y a partir de esa hora empieza a descender con una mayor pendiente hasta alcanzar -0.38 m a las 23:30. La menor amplitud de marea de este evento deriva en una menor distancia entre las líneas de costa detectadas a lo largo de ese día como se observa en la figura 43.

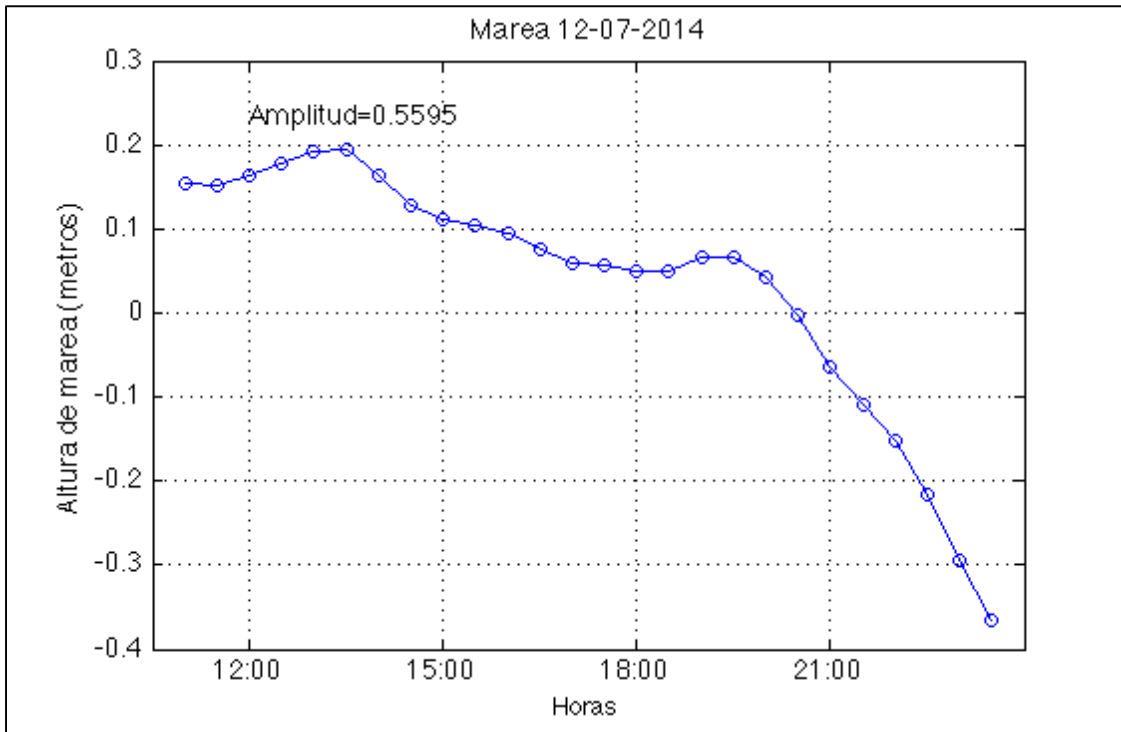


Figura 42. Variación de la marea obtenidas de mediciones del mareógrafo de Sisal, Yucatán para el segundo evento.



Figura 43. Imagen de exposición temporal de la cámara 3 y líneas de costa obtenidas durante un día.

7.4.4 Validación LCE rectificada

Las diferencias que se presentaron de la comparación entre la LCE rectificada y la línea de costa medida usando el GPS el 14 de octubre del 2014 a la 1930 UTC se presentan en la figura 44 y en la tabla 5 se presentan indicadores de esta comparación. El ECM permite ver las diferencias debido a la rectificación de la LCE así como a la medición de la línea. Es importante tener en cuenta que la línea de costa que se observó en el GPS no necesariamente tiene que corresponder con lo observado en las imágenes, ya que aunque en el levantamiento con GPS se midió considerando el run-up, la medición se realiza en un momento, mientras que la imagen de exposición temporal captura datos de diez minutos y los promedia, así que la medición GPS puede realizarse durante el momento en que llegan olas menores o mayores al promedio de oleaje de diez minutos y la línea de costa observable puede variar.

De las cámaras la que tiene el menor ECM es la cinco. La diferencia aumenta al desplazarse al este (disminuyendo el número de cámara) con los mayores ECM en la cámara uno y dos. Cabe resaltar que los ECM de esta comparación son similares a los errores de la comparación de la LCE con la LCd (Tabla 4). Por otra parte la desviación estándar es un indicador de la variación de los errores, esta variación está más relacionada con la detección de la LCE asociados a cada cámara, ya que a mayor desviación estándar las mediciones son menos consistentes. Las cámaras con mayor desviación estándar son la uno, tres y cuatro. Mientras que la las cámaras dos y cinco tienen desviaciones estándar menores a 0.5 m (la resolución de las imágenes en vista de planta).

Tabla 5 Error promedio, error cuadrático medio y desviación estándar de la comparación de la línea de costa rectificadas y con GPS.

Cámara	Promedio	ECM	Desviación Estándar
1	-1.46	1.66	0.80
2	-1.77	1.80	0.34
3	-1.00	1.40	0.89
4	0.45	0.93	0.82
5	-0.37	0.61	0.48

En la figura 45 puede observarse la LCE sobre las imágenes oblicuas de cada cámara. En estas puede observarse con mayor detalle la detección de la línea de costa la cual parece realizarse de manera correcta. La alta desviación estándar de los errores de las cámaras 3 y 4 está asociado fuertemente a la variabilidad asociada a la detección de la línea de costa. En cuanto a la cámara 1, que presenta los mayores errores, se puede observar en un cuadro negro (figura 44 y 45) la zona más alejada con respecto a las cámaras, esa zona presenta la mayor variación en los errores.

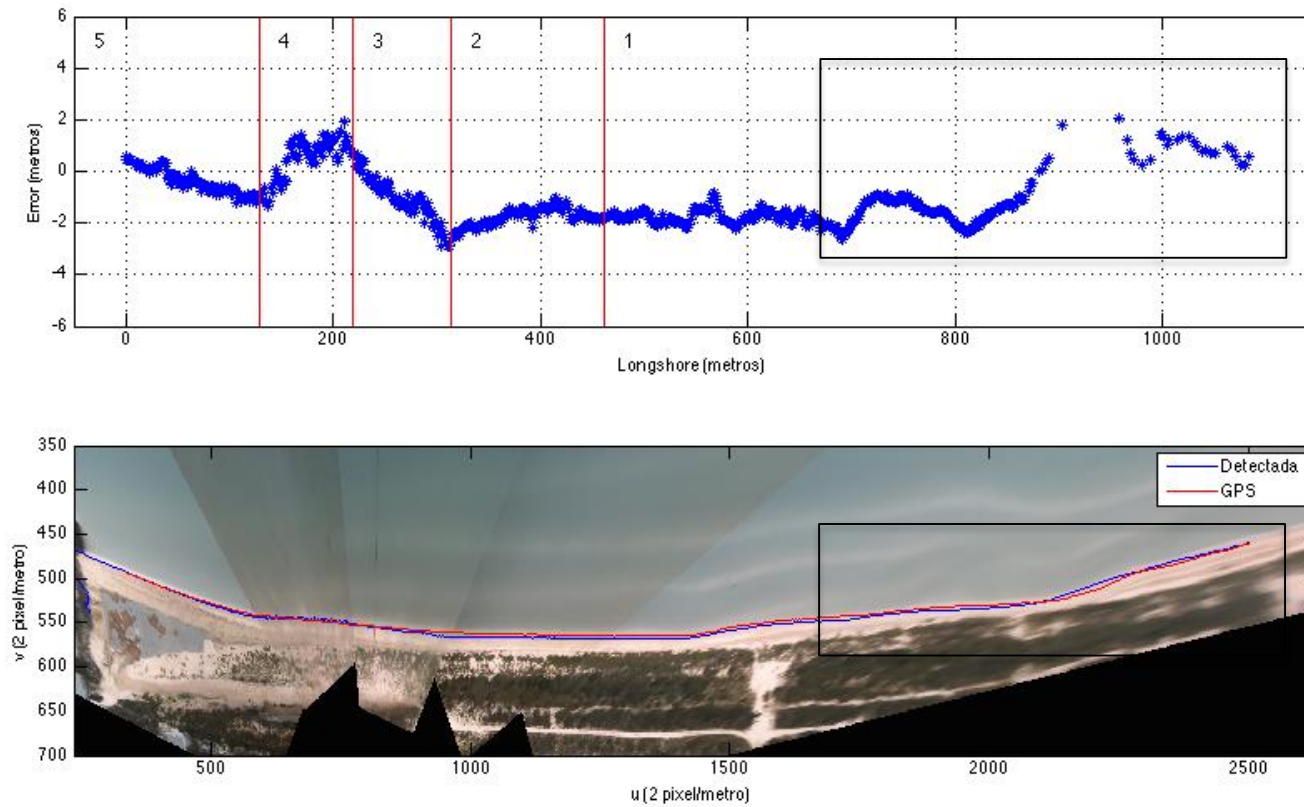


Figura 44. Diferencias entre la LCE rectificada y la línea de costa obtenida con GPS. El panel superior muestra los errores en metros. El panel inferior muestra las dos líneas sobre una imagen en vista de planta. En un cuadro negro se resalta la parte lejana que corresponde al mismo cuadro negro en la figura 45.

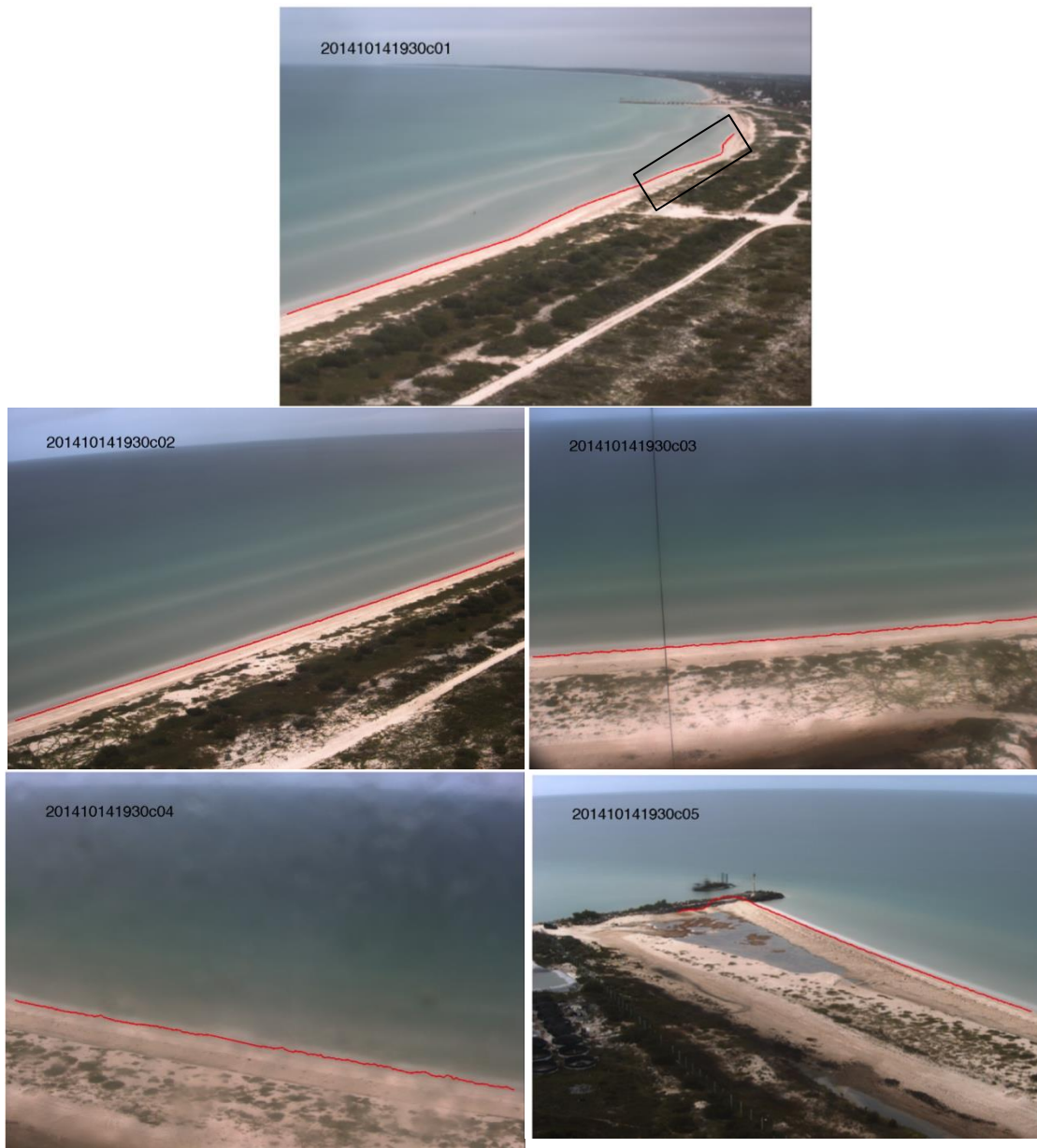


Figura 45. Imágenes oblicuas de las 5 cámaras y la LCE de cada imagen. En la cámara 1 se puede observar la región que corresponde a la parte lejana (cuadro negro).

7.4.5 Modelo de elevación y pendiente de la playa

A continuación se presenta la comparación entre el modelo de elevación de la cara de la playa obtenida con las líneas de costa y los perfiles obtenidos de un levantamiento topográfico para el día 01 de julio del 2015. Dicho día la amplitud de marea durante el periodo de captura de las cámaras fue de 0.59 metros. En dicho evento las mayores diferencias entre la altura de la marea de cada hora sucedieron después de las 18:00 horas UTC (figura 46).

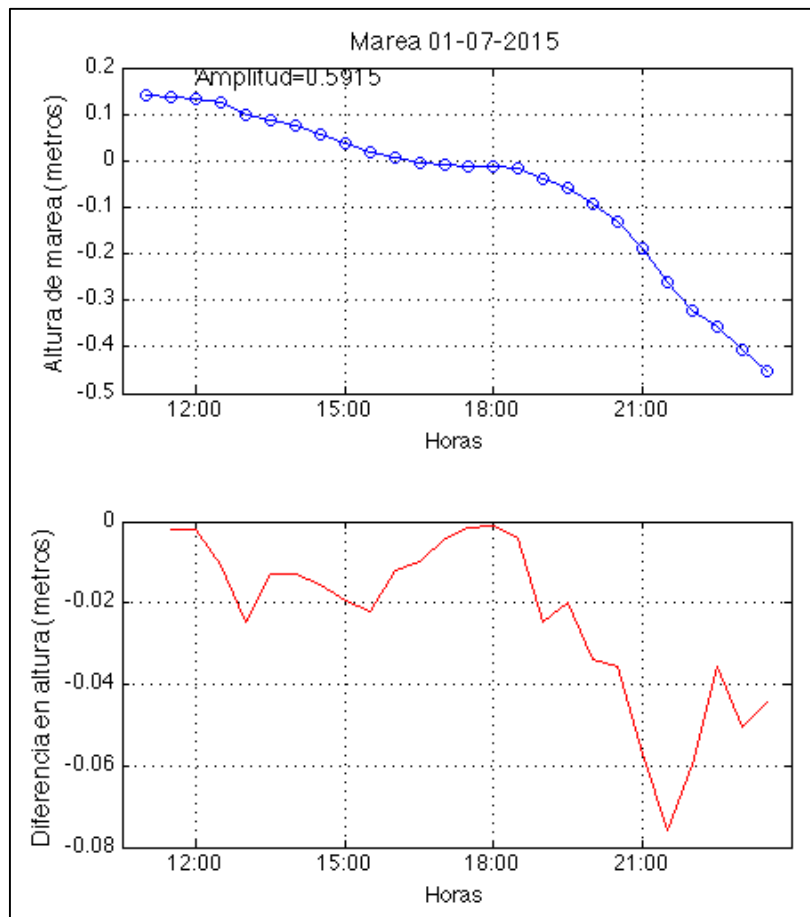


Figura 46. Variación de la altura de marea cada media hora (superior) y la diferencia entre mediciones (inferior).

La distribución de los perfiles a lo largo de la costa se muestra en la figura 47. El modelo digital de elevación generado y proyectado usando ArcGIS se presenta en la figura 48. En total se tienen diez perfiles sobre el área que se está trabajando con las cámaras.



Figura 47. Posición de los perfiles de playa obtenidos a lo largo de la zona que cubren las cámaras.

Se presentan los perfiles obtenidos en el campo de visión de 4 cámaras: el perfil 1 en la cámara 5, el perfil 3 en la cámara 4, el perfil 5 en la cámara 2 y los perfiles 7 y 8 para la cámara 1 en la figura 49. Para calcular la pendiente del perfil obtenido de las LC sólo se consideraron las posteriores a las 1830 UTC, debido al error que puede observarse en las líneas de costa que fueron obtenidas en horas anteriores.

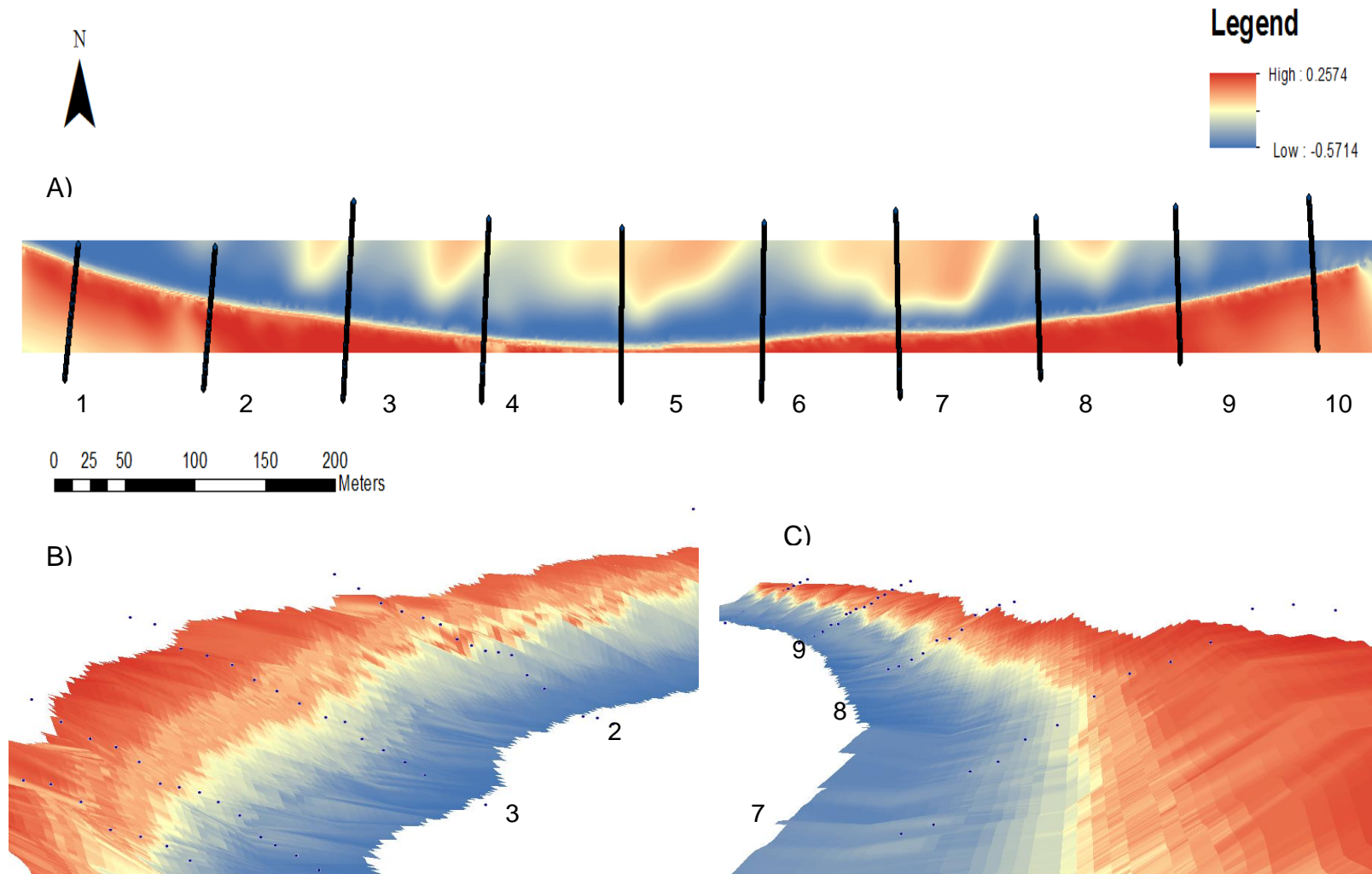


Figura 48. MDE del 2015 del 07 de 01. Se presenta en vista de planta (A), vista desde el Este (B), y vista desde el Oeste (C). Sobre el MDE se proyectan los perfiles de la topografía con la que se compararon. En escala de colores se presenta la elevación, la escala de la proyección de la elevación de 1m a 20m.

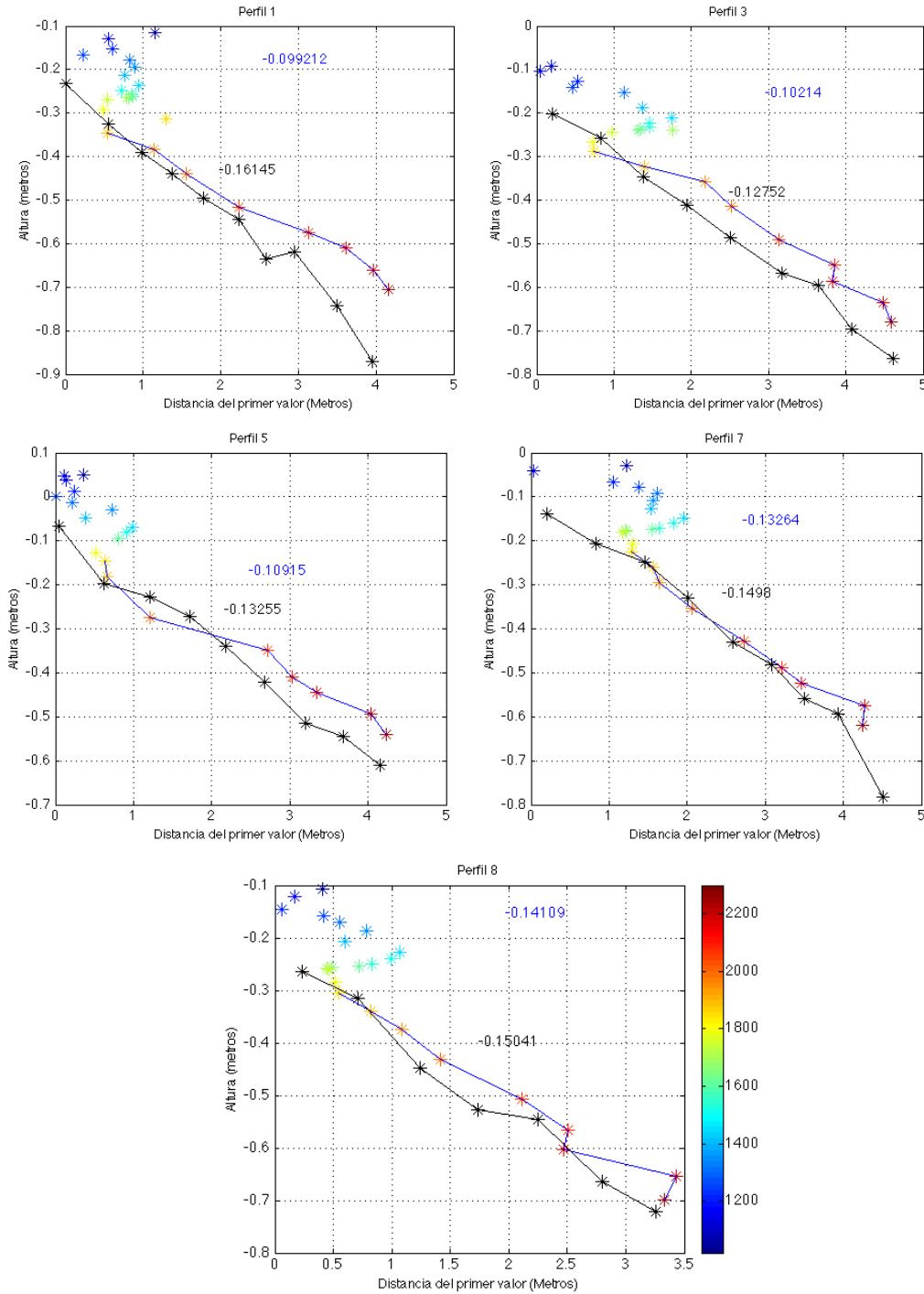


Figura 49. Comparación de perfiles de playa entre levantamiento GPS (negro) y el obtenido usando el modelo de elevación (azul). El valor en la gráfica del mismo color que la línea representa la pendiente de cada perfil. Los asteriscos de colores representan la ubicación de la línea de costa y varían de color dependiendo la hora que fueron detectados.

La baja variación de la marea en las mediciones de las primeras horas, produce que la variación de la detección sea mayor a la variación en la posición de la línea de costa, por lo que las líneas de costa extraídas de las imágenes no permiten trazar la forma de la playa. Sin embargo, cuando la variación de la marea aumenta el perfil formado por las líneas de costa tiene una forma similar al obtenido con GPS y presenta una pendiente parecida. Los valores de pendiente se resaltan en la figura 50 donde se comparan las pendientes de los diez perfiles. Los perfiles que presentan una mayor diferencia en la pendiente son los que se encuentran en los extremos del área de estudio.

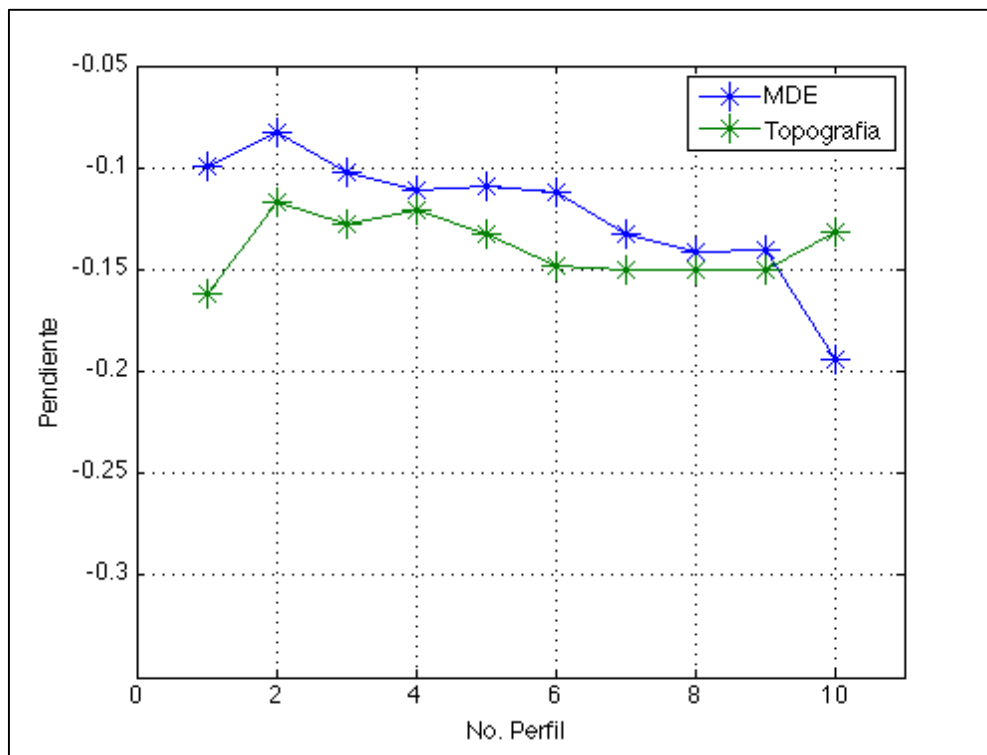


Figura 50. Pendiente del perfil de la cara de la playa obtenido de del MDE usando líneas de costa (azul) y de los perfiles del levantamiento GPS (verde).

DISCUSIÓN

En este trabajo se evaluó la obtención de modelos digitales de elevación (MDE) de la cara de la playa de Sisal generados a partir de líneas de costa extraídas de imágenes de video, obtenidas de un sistema fijo de video monitoreo costero, y asociadas a un nivel del mar. Para esto, primero se calcularon los parámetros que permiten calibrar las cámaras y rectificar las imágenes que generan. Seguidamente, desarrolle un algoritmo que detecta la línea de costa a partir de la clasificación de las imágenes usando la información del color en HSV. Se evaluó la utilización de esta técnica junto con otros algoritmos pre-escritos que detectan bordes de imágenes, comparándolos con líneas de costa digitalizadas manualmente (LCd) para dos fechas. Se eligieron los días 27 de enero del 2014 y 12 de julio del 2014 porque presentaron las mayores amplitudes de la marea durante el flujo y reflujó en las horas de captura de imágenes y había disponibilidad de imágenes con una buena visibilidad de la playa. Posteriormente, programé una rutina que visualiza las líneas de costa obtenidas con distintos métodos y permite, al usuario, elegir la línea de costa del método que mejor represente la interfaz entre mar y playa, dando la opción, si se requiere, de editar la línea para representar mejor la línea de costa observada. La línea de costa elegida (LCE) se evaluó comparándola con las LCd de los días antes mencionados, y se comparó con una medición de la línea de costa utilizando GPS. Para la obtención del MDE se asociaron las LCE obtenidas a lo largo de un día a la altura del nivel del mar correspondiente, obtenidas del mareógrafo de Sisal. La generación del MDE se comparó contra perfiles de playa medidos con GPS.

La medición de la línea de costa a partir de las imágenes obtenidas de las cámaras requiere poder transformar la posición observada de línea de costa en las imágenes a su posición con respecto a un sistema de coordenadas, esto se hace mediante el cálculo de parámetros asociados a la cámara (intrínsecos) y a su posición y orientación con respecto a un marco de referencia (extrínsecos). La

calibración de los parámetros extrínsecos requirió de la correcta medición de la posición de las 5 cámaras y de 28 puntos de control en tierra, medidos utilizando GPS en distintas campañas. Con los parámetros calculados a partir de estas mediciones fue posible transformar las imágenes oblicuas obtenidas de las 5 cámaras a una imagen mosaico en vista de planta con una resolución constante de 2 pixel/metro.

Para este trabajo se desarrollaron tres métodos para detectar la línea de costa: HS- media, HSV-media y HS-Otsu. Estos métodos están basados en el método presentado por Aarninkhof (2003) y clasifican los pixeles de una región de interés (ROI) de una imagen en playa seca y húmeda, usando información del matiz, saturación y brillo (HSV). A partir de las imágenes clasificadas se generan matrices de bordes de las cuales es posible extraer la línea de costa, identificando la línea más continua a lo largo de la imagen. Estos métodos se evaluaron junto con dos métodos que se utilizan para detectar bordes: el método Laplaciano de Gaussiano (LoG) y el método Canny. De los 5 métodos, el que mejores resultados arrojó es el que clasifica la imagen utilizando el método Otsu para detectar el valor umbral (HS- Otsu). El método que utiliza la media como valor umbral (HS-Media) genera resultados casi idénticos a HS-Otsu; sin embargo, cuando presenta resultados diferentes estos presentan mayor error. En lo posterior se recomienda descartar el método HS-media y sólo utilizar HS-Otsu para disminuir el tiempo de cómputo. Con respecto al método que incorpora la matriz de brillo a la clasificación (HSV-Media), este fue diseñado para arrojar resultados correctos cuando los métodos HS-media o HS-Otsu fallan por efecto de sobreexposición a la luz. Dicho algoritmo suele fallar al detectar como línea de costa la parte hacia mar de la franja provocada por el swash. Es recomendable evaluar el desempeño de este algoritmo utilizando el método Otsu para obtener un valor umbral en lugar de la media aritmética. Los métodos LoG y Canny resultaron ser útiles al arrojar líneas de costa aceptables o buenas cuando los demás métodos fallaron, esto se nota si se observa, sobre todo, el día 27 de enero del 2014 (figura 33). Los métodos HS-

Otsu, LoG, y Canny funcionan de manera complementaria, derivando en LCE buenas y aceptables.

El suavizado y la interpolación supervisada por el usuario mejoran el desempeño de la LCE la cual arroja mejores estimaciones que los 5 métodos al compararla con la línea de costa digitalizada manualmente. Este proceso tarda menos de 60 minutos para cada día, dependiendo del número de imágenes (las cuales pueden llegar a ser 130 para las 5 cámaras) y de la efectividad de la detección de los métodos ya que si las líneas de costa arrojadas por alguno de los métodos son buenas estimaciones, no requerirán ser editadas por lo que el proceso se realiza mucho más rápido. La automatización de la elección de la línea de costa correcta, y eliminación de errores sería lo ideal. Uunk et al.,(2010) y Osorio et al., (2012) muestran dos ejemplos distintos en los cuales se obtienen buenos resultados. Sin embargo el método supervisado presentado en este trabajo es válido para obtener la línea de costa ya que arroja buenos resultados con ECM de 3.22 pixeles y 0.76 metros en promedio al comparar la LCE y LCd, excluyendo la cámara cuatro. Estos errores son similares a los que reportan Osorio et al., (2012) al comparar varios métodos contra detecciones manuales de la línea de costa, con errores promedio de 6.197 ± 3.59 pixeles para el método Canny, 2.907 ± 4.48 pixeles para PIC, y 1.857 ± 1.78 pixeles para el método que presentan: PatternWL.

Los errores encontrados en este trabajo, que afectan sobre todo a la cámara cuatro, corresponden a los errores asociado al modelo de detección reportados por Osorio et al.,(2012), los cuales son cambios atmosféricos, exceso de luz, sobreexposición, y pixeles dañados (los cuales en este trabajo se dan por la presencia de gotas de agua y humedad en las carcasas). Mientras que para las demás cámaras estos errores son pequeños, en la cámara cuatro son constantes, y afectan severamente la obtención de la línea de costa. Debe considerarse revisar a detalle este equipo, y considerar una forma de limpiarlo constantemente, además de la opción de utilizar algún filtro en las lentes para disminuir la sobreexposición. Mientras tanto, si los métodos de detección no funcionan, se

recomienda digitalizar la línea de costa manualmente; ya que, al ser sólo una cámara no es un trabajo tan laborioso.

La cámara uno es la que cubre una mayor distancia de la costa. Sola cubre más distancia que las otras cuatro. Con motivo de análisis puede dividirse en dos secciones, una parte cercana (aproximadamente 250 metros) y una parte lejana (aproximadamente 400 metros). En la figura 44 y figura 45 esta sección se presenta con un cuadro negro. Se ve claramente que la parte lejana, representa una pequeña porción de la imagen oblicua (aproximadamente el 20% de la LCE). Sin embargo, cuando se transforman las imágenes a vista en planta, esta zona al estar más alejada de la cámara corresponde a un área mucho mayor. Por esto los errores que aparentemente en la imagen oblicua no son muy grandes, se magnifican después de la rectificación. Sin embargo Holman y Stanley (2007) mencionan que la mayor pérdida de resolución en las estaciones de video monitoreo se da en las distancias a lo largo de la costa (figura 51), debido a que conforme se aleja de la cámara el pixel, su huella de pixel (distancia que representa) se alarga. Además, la distancia entre las cámaras y la línea de costa, en la vertical, es relativamente contante, por lo que la distancia que representa un pixel en Y varía menos, a lo largo de la costa. En la figura 52 se presenta una grafica a escala en la que puede observarse el área que representa un pixel en una distancia cercana a las cámaras (14 m) y a mayor distancia (650 m). Al analizar las huellas de pixel a lo largo de la línea de costa hasta 650 m alejados de las cámaras, para la estación de Sisal (figura 53), se observa que la huella de pixel varía en la vertical entre 0.16-0.6 m y en la horizontal entre 0.05-3.1 m. Por lo que, puede asumirse que la variación máxima debido a la representación en la vertical es de 0.6m.

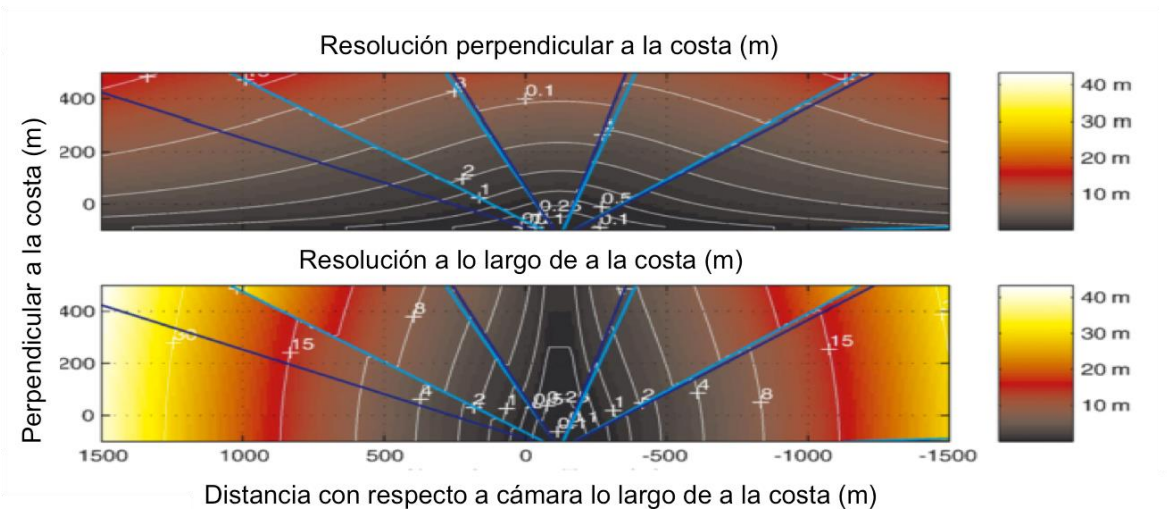


Figura 51. Mapas de resolución de pixeles para la estación Argus “Jan van Speyk” en Holanda. Modificado de Aarninkhof (2003).

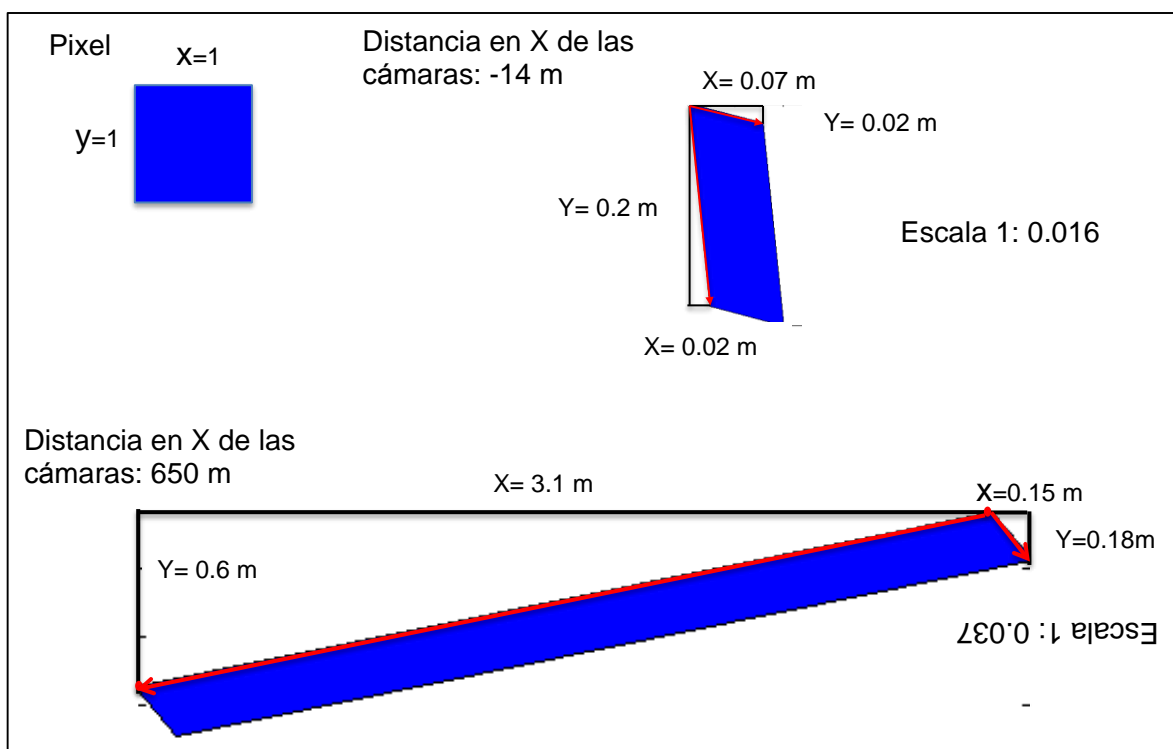


Figura 52. Representación de la huella de pixel de esta ción de Sisal: a -14 m paralelo a la costa de las cámaras y a 650 m paralelo a costa de las cámaras. Las distancias negativas se encuentran al Oeste de las cámaras, los positivos al Este.

La alta desviación estándar que presenta la cámara 1 con respecto a las demás cámaras está altamente influenciada por la parte lejana, pues como se ve en la figura 44, la parte cercana tiene poca variación. Cabe resaltar que aunque la parte lejana representa una mayor porción de la línea de costa, la sección cercana es la que tiene más datos, por la variación en la representación horizontal del pixel, por eso el ECM no se ve tan influenciado por las variaciones de la parte lejana. Las demás cámaras ven distancias bastante cercanas (menores a 300 m), por lo que no sufren mayor problema por la pérdida de resolución.

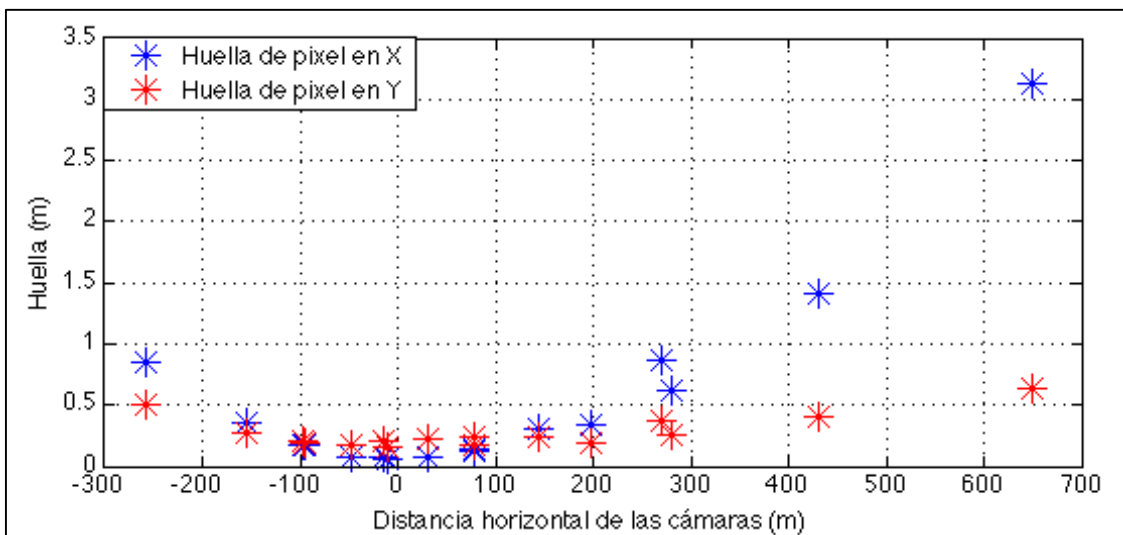


Figura 53 Huella de pixel paralelo (X) y vertical (Y) a la costa a distintas distancias de las cámaras de la estación de Sisal.

La diferencia de casi 2 metros en la cámara uno y dos con respecto a las mediciones GPS puede deberse tanto a la rectificación como a la incertidumbre de la medición de la línea de costa caminando sobre ella. Este método es similar al que presenta Aarninkhof et al., (2003). Otra forma de evaluar la detección de la ubicación de la línea de costa sería obtener líneas de costas asignadas a un nivel de elevación extraídas de modelos de elevación ya sean de datos LIDAR o levantamientos GPS. La comparación de estos permitiría evaluar la detección sin incorporar la incertidumbre que provoca el run-up al intentar marcar la línea de costa caminando sobre está con el equipo GPS. A pesar de esto la variación de los errores es baja (menor a 1 metro), por lo que la línea de costa extraída de las

imágenes de la playa de Sisal con el método aquí presentado, es un buen estimador para medir los cambios en la línea de costa que suceden a escalas mayores a un metro. Por otra parte es de notar que el menor ECM observado en esta comparación se presenta en la cámara cinco. A diferencia de las demás cámaras, tres puntos de control en tierra de la cámara cinco son permanentes (dos corresponden a las columnas que delimitan el terreno de la Unidad Académica Sisal, y el tercero es una esquina del faro de la escollera). Los puntos de control de las demás cámaras son postes semipermanentes colocados con el objetivo de funcionar como puntos de control. Los postes han funcionado bien, pues han facilitado mucho la rectificación de las imágenes, pero hay que tener en cuenta que están expuestos a que usuarios de la playa los muevan, o en caso de suceder una inundación de la playa, estos puedan moverse. Por lo que parte del error de esta comparación puede estar asociado a la rectificación a vista de planta de la información de las líneas de costa.

Como se puede notar en el trabajo, la calibración de las cámaras y rectificación correcta de las imágenes es un proceso fundamental para obtener buenos resultados. Holman y Stanley (2007) analizaron las variaciones en la inclinación de las cámaras y el movimiento en píxeles que esto representaba encontrando que diariamente y semanalmente hay variaciones cercanas a los 2 píxeles las cuales asociaron a los efectos de las variaciones de temperatura diurnas en la estructura en las que están montadas las cámaras, las cuales son en general torres altas de metal. Variaciones mayores se dan en escalas de tiempo más largas, estas se dan en forma de saltos y pueden ser mayores a diez píxeles. Es altamente recomendable que además de realizar rectificaciones de las imágenes cada cierto tiempo, se corrobore que la posición de los postes sigue siendo la medida. Esto puede realizarse fácilmente con equipo GPS utilizando la opción de replanteo, la cual dirige al operador, al punto de control previamente medido, por lo que es posible corroborar si este sigue en su sitio.

El modelo de elevación generado para el 1 de julio del 2015 presentó una buena relación con el levantamiento topográfico para las cinco cámaras, excepto para la zona lejana en donde las pendientes presentan mayor diferencia. El mes de julio en Sisal se caracteriza por no presentar vientos fuertes que provoquen grandes olas. Para estas condiciones la obtención de la altura considerando sólo la variación de la marea permite obtener una buena estimación de la elevación la cara de la playa, sin embargo para obtener estimaciones más precisas en temporadas cuando la intensidad del oleaje es mayor es recomendable, si se cuenta con los datos, corregir la elevación tomando en cuenta la sobre elevación por el oleaje tal como describe Aarninkhof (2003), ya que como presenta Plant et al., (2007) esta corrección permite que el modelo de elevación mejore.

Para poder obtener un modelo de elevación aceptable fue necesario descartar como parte del análisis las posiciones de las líneas de costa anteriores a las 1830 horas. En estas horas la variación de la altura de la marea es menor a 0.02 m cada media hora, como se puede observar en la figura 45. Ya que la costa de Sisal tiene un rango micromareal máximo de 1, son pocos los días que superan amplitudes de marea mayores a 0.5 m. Según el análisis mostrado en la tabla 3, los días de mayor amplitud suelen ocurrir en los meses de diciembre y enero, en los cuales hay una alta incidencia de eventos de nortes, los cuales disminuyen la visibilidad de las cámaras, además de presentarse mayor cantidad de vegetación acuática. Esto representa una fuerte limitante para la aplicación del modelo propuesto en la playa de Sisal. A pesar de esto, es posible la obtención de modelos de elevación de la cara de la playa, pero se debe tener un control estricto de las líneas de costa que se utilizan como datos de entrada. Los errores de detección afectan mucho la obtención de los MDE, es altamente recomendable editar las líneas que presentan errores de detección evidentes y digitalizar manualmente las que no fue posible obtener, para generar modelos más reales.

El potencial de las líneas de costa extraídas de imágenes de exposición prolongada para servir como indicadores para al monitoreo y manejo de los

problemas relacionados a la estabilidad costera fue analizado por Kroon et al., (2007). Los indicadores analizados incluyen: líneas de costa a una elevación fija, volumen de la playa intermareal, y la posición momentánea de la línea de costa. Estos indicadores sirvieron para cuantificar la magnitud, tiempo y distribución espacial de las variaciones estacionales y la respuesta ante tormentas de la línea de costa. Además, resultaron superiores a indicadores obtenidos de técnicas de monitoreo tradicionales, al permitir observar los cambios ocurridos en periodos de días, ya que las observaciones se realizan a una alta frecuencia y son posibles en condiciones extremas. En todos los casos las señales medidas fueron mayores que la incertidumbre asociada al indicador. Dentro de un esquema de manejo los indicadores analizados sirven para decidir cuándo es necesario intervenir y realizar, por ejemplo: rellenos de playa (como en la playa de Egmond, Holanda), o dragados en canales (en El Puntal, España); además de medir la eficiencia de las intervenciones a lo largo del tiempo. Indicadores homólogos o similares pueden generarse a partir de este trabajo y aplicarse a distintas necesidades de manejo costero en México.

CONCLUSIONES

Es posible generar MDE de la cara de playa de Sisal a partir de líneas de costa extraídas de imágenes de video obtenidas a lo largo de un día, por la estación de monitoreo de Sisal, y asociándolas a una altura del nivel del mar medida. Es necesario que se presente una variación de la marea entre cada medición mayor que la incertidumbre asociada a la detección de la línea de costa, en la validación del MDE, en este trabajo, se observó que la variación de la elevación del mar debe ser mayor de 0.02 cm. Debe tenerse un estricto control de las líneas de costa que son utilizadas para este proceso, y en caso de presentar errores de detección deben ser descartadas o editadas manualmente.

Programé las rutinas en Matlab® que extraen la línea de costa de imágenes de video en dos procesos: una primera parte completamente automatizada en la cual se utilizan 5 métodos para generar cada uno una posible líneas de costa; y un segundo proceso supervisado por el usuario en el cual se elige la línea que mejor se ajusta a la línea de costa observable, añadiendo la posibilidad de editar si se considera necesario.

De los métodos empleados para detectar la línea de costa, el que mejores resultados presento es HS-Otsu, sin embargo se recomienda el empleo de los métodos LoG, y Canny, así como una revisión al método HSV-media, ya que generan resultados distintos, lo cuales pueden ser correctos cuando el método HS-Otsu falla. Los métodos presentados pueden seguir mejorando para hacer más rápida y eficiente la detección utilizando, por ejemplo, filtros morfológicos. Es recomendable probar otras técnicas que arrojen resultados distintos a los presentados, entre las técnicas que pueden evaluarse están ratios RGB y el empleo de ANN.

Asimismo, automaticé el proceso de asignación de una elevación a las líneas de costa, en el cual se busca y se procesa los valores de niveles del mar de una base datos de mediciones del mareógrafo. También, automaticé el empleo de las rutinas que permiten la rectificación de las líneas de costa.

Por si solas las líneas de costa generadas por este proceso, presentan un gran potencial para evaluar la variabilidad de la morfología de la playa de Sisal. Además, la creación de MDE permite monitorear el comportamiento de la cara de la playa. Las rutinas generadas en este trabajo, ya están siendo utilizadas para evaluar la variabilidad de la línea de costa de Sisal en un trabajo de posgrado, además se está evaluando su utilidad en estaciones de monitoreo costero instaladas en otras playas de México.

Estas técnicas derivadas del video monitoreo costero no remplazan a otros métodos para monitorear la costa, como son los levantamientos con GPS, o la observación usando imágenes satelitales, sino que, permiten llenar un vacío espacial y temporal de información, lo que ayudará a aumentar nuestro conocimiento acerca de los procesos costeros, y mejorar el manejo que realicemos de la zonas costeras.

BIBLIOGRAFÍA

- Aarninkhof, S. (2003). *Nearshore bathymetry derived from video imagery*. Tesis de Doctorado. Universidad Tecnica de Delft. Obtenido de <http://agris.fao.org/agris-search/search/display.do?f=2013/AV/AV201201566001566.xml;AV20120156667>
- Aarninkhof, S., Turner, I. L., Dronkers, T. D. ., Caljouw, M., y Nipius, L. (2003). A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. *Coastal Engineering*, 49(4), 275–289. doi:10.1016/S0378-3839(03)00064-4
- Ache, B. W., Crossett, K. M., Pacheco, P. A., Adkins, J. E., y Wiley, P. C. (2013). “The Coast” is Complicated: A Model to Consistently Describe the Nation’s Coastal Population. *Estuaries and Coasts*, 1–5. doi:10.1007/s12237-013-9629-9
- Alarcón, C. A. O. (2008). *Metodología para la construcción de indicadores morfodinámicos a través del uso de cámaras de vídeo. Caso de aplicación: playa de la Magdalena (Cantabria, España)*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- Alexander, P. S., y Holman, R. a. (2004). Quantification of nearshore morphology based on video imaging. *Marine Geology*, 208(1), 101–111. doi:10.1016/j.margeo.2004.04.017
- Appendini, C. M., Salles, P., Mendoza, E. T., López, J., y Torres-Freyermuth, A. (2012). Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 285, 1404–1417. doi:10.2112/JCOASTRES-D-11-00162.1
- Appendini, C. M., Torres-Freyermuth, A., Salles, P., López-González, J., y Mendoza, E. T. (2014). Wave climate and trends for the Gulf of Mexico: A 30-yr wave hindcast. *Journal of Climate*, 27(4), 1619–1632. doi:10.1175/JCLI-D-13-00206.1
- Archetti, R., Schiaffino, C., Ferrari, M., Brignone, M., y Rihouey. (2008). Video systems for the coastal monitoring. En Beach Erosion Monitoring, Pranzini. En W. L. Pranzini E (Ed.), *Beach Erosion Monitoring* (pp. 101–109). Fiorentina: Nuova Grafica.
- Axis Ingeniería. (n.d.). Programa de Voluntarios para Monitoreo de Playas. Obtenido en Junio 1, 2015, de <http://www.perfilesdeplayavoluntarios.com/>
- Azuz Adeath, I. A. (2004). El manejo de los cambios en la morfología costera. En F. Rivera-arriaga, Evelia; Villalobos Zapata, J.; Azuz Adeath, Isaac; Rosado May (Ed.), *El Manejo Costero en México* (pp. 235 – 252). Campeche.

- Azuz-Adeath, I., y Rivera-Arriaga, E. (2009). Descripción de la dinámica poblacional en la zona costera mexicana durante el periodo 200-2005. *Papeles de Población*, 15, 75–107. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/pp/v15n62/v15n62a3.pdf>
- Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology. An introduction* (Segunda ed., Vol. 1). John Wiley y Sons Ltd. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Boak, E. H., y Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 214, 688–703. doi:10.2112/03-0071.1
- Chen, W. C. W., Shi, Y. Q., y Xuan, G. X. G. (2007). Identifying Computer Graphics using HSV Color Model and Statistical Moments of Characteristic Functions. *Multimedia and Expo, 2007 IEEE International Conference on*. doi:10.1109/ICME.2007.4284852
- Chickadel, C.C., et al. (2003). An optical technique for the measurement of longshore currents. *Journal of Geophysical Research*, 108, 3364.
- Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD). (1992). *Programa 21*. Rio de Janeiro. Obtenido de <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21spchapter1.htm>
- Cuevas-Jiménez, A., y Euán-Ávila, J. (2009). Morfodinámica del perfil de playa con sedimentos carbonatados en la Península de Yucatán. *Ciencias Marinas*, 35, 307–319. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-38802009000300006yscript=sci_arttext
- Davidson, M., Van Koningsveld, M., de Kruif, A., Rawson, J., Holman, R., Lamberti, A., ... Aarninkhof, S. (2007). The CoastView project: Developing video-derived Coastal State Indicators in support of coastal zone management. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 463–475. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.007
- Dubois, R. N. (1972). Inverse relation between forshore slope and mean grain size as a a function of heavy mineral content. *Geological Society of America Bulletin*, 83, 871–875.
- Emery, K. O. (1961). A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and Oceanography*, 6, 90–93.
- Enriquez, C., Mariño-Tapia, I. J., y Herrera-Silveira, J. a. (2010). Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research*, 30(2), 127–137. doi:10.1016/j.csr.2009.10.005
- Enriquez, C., Mariño-Tapia, I., Jeronimo, G., y Capurro-Filigrasso, L. (2013). Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research*, 69, 101–109. doi:10.1016/j.csr.2013.08.018

- Errea-Abad, M. P. (1999). Gestión territorial e investigación científica con sistemas de información geográfica en el instituto pirenaico de ecología (CSIC). En L. L. Huerta (Ed.), *Los sistemas de información geográfica en los riesgos naturales y en el medio ambiente* (pp. 177–188). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- ESRI. (2012). Cómo funciona De topo a ráster. Obtenido de <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009z0000007m000000>
- Figueroa-espinoza, B., Salles, P., y Zavala-hidalgo, J. (2014). On the wind power potential in the northwest of the Yucatan Peninsula in Mexico, *27*(1), 77–89.
- Harley, M. D., Turner, I. L., Short, A. D., y Ranasinghe, R. (2011). Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring. *Coastal Engineering*, *58*(2), 194–205. doi:10.1016/j.coastaleng.2010.09.006
- Hervás, J. L. G. (2013). *Remote Sandbar Mapping At a Multibarred Beach. Sisal, Yucatan*. Tesis de Maestría. Universidad de Cantabria.
- Holland, T., y Holman, R. (1997). Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. *Oceanic Engineering ...*, *22*(1), 81–92. Obtenido de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=557542
- Holman, R. A., y Bowen, A. J. (1984). Longshore structure of infragravity wave motions. *Journal of Geophysical Research*, *89*, 6446–6452.
- Holman, R., y Stanley, J. (2007). The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering*, *54*, 477–491. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.003
- Holman, R.A., Guza, R. T. (1984). Measuring run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, *8*, 129–140.
- Holman, R.A., Lippmann, T.C., O'Neill, P.V., Hathaway, K. K. (1991). Video estimation of subaerial beach profiles. *Marine Geology*.
- Hutchinson, M. F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, *106*, 211–232.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2000). Aspectos Geograficos. Obtenido de http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/aepef/2000/aspgeo.pdf
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2015). Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Obtenido en Mayo 15, 2015, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/gps.aspx?dv=c1>

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (R. K. P. and L. A. M. Core Writing Team, Ed.). Geneva, Switzerland.
- Jiménez, J. a., Gracia, V., Valdemoro, H. I., Mendoza, E. T., y Sánchez-Arcilla, A. (2011). Managing erosion-induced problems in NW Mediterranean urban beaches. *Ocean y Coastal Management*, 54(12), 907–918. doi:10.1016/j.ocecoaman.2011.05.003
- Jiménez, J. a., Osorio, a., Marino-Tapia, I., Davidson, M., Medina, R., Kroon, a., ... Aarnikhof, S. G. J. (2007). Beach recreation planning using video-derived coastal state indicators. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 507–521. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.012
- Kingston, K. S. (2003). *Applications of complex adaptive systems, aproaches to coastal systems*. Tesis de Doctorado. University of Plymouth. UK.
- Komar, P. D. (1998). *Beach Processes Sedimentation* (Second Edi.). New Jersey: Prentice Hall.
- Kroon, A., Davidson, M. a., Aarninkhof, S., Archetti, R., Armaroli, C., Gonzalez, M., ... Spanhoff, R. (2007). Application of remote sensing video systems to coastline management problems. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 493–505. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.004
- Lara-Lara, J. R., Arreola-Lizárraga, J. A., Calderon-Aguilera, L. E., Camacho-Ibar, V. F., de la Lanza-Espino, G., Escofet-Giansone, A., ... Zertuche-González, J. A. (2008). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. *Capital Natural de México. Vol. 1. Conocimiento Actual de La Biodiversidad, I*, 109–134.
- Lee, J., Park, J., y Choi, J. (2013). Evaluation of Sub-aerial Topographic Surveying Techniques Using Total Station and RTK-GPS for Applications in Macrotidal Sand Beach Environment, (65), 535–540. doi:10.2112/SI65-091.1
- Lippmann, T. C., y Holman, R. a. (1989). Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation. *Journal of Geophysical Research*, 94(C1), 995. doi:10.1029/JC094iC01p00995
- Lippmann, T. C., y Holman, R. a. (1991). Phase Speed and Angle of Breaking Waves Measured with Video Techniques. In N. Kraus (Ed.), *Coastal Sediments* (pp. 542–556). New York.
- Longuet-Higgins, M. S., y Stewart, R. w. (1964). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 11(4), 529–562. doi:10.1016/0011-7471(64)90001-4
- Madsen, A. J., y Plant, N. G. (2001). Intertidal beach slope predictions compared to ® eld data, 173.

- Medina, R., Marino-Tapia, I., Osorio, a., Davidson, M., y Martin, F. L. (2007). Management of dynamic navigational channels using video techniques. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 523–537. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.008
- Mendoza, E., y Trejo-Rangel, M. (2013). Storm characterization and coastal hazards in the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, (65), 790–795. doi:10.2112/SI65-134.1
- Moreno-Casasola, P. (2006). Playas y dunas. In *Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal*. (Vol. 1, pp. 121–149).
- Nieto, M. a., Garau, B., Balle, S., Simarro, G., Zarruk, G. a., Ortiz, a., ... Orfila, a. (2010a). An open source, low cost video-based coastal monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(14), 1712–1719. doi:10.1002/esp.2025
- Nieto, M. a., Garau, B., Balle, S., Simarro, G., Zarruk, G. a., Ortiz, A., ... Orfila, A. (2010b). An open source, low cost video-based coastal monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(14), 1712–1719. doi:10.1002/esp.2025
- Ojeda, E., y Guillén, J. (2008). Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. *Marine Geology*, 253(1-2), 51–62. doi:10.1016/j.margeo.2008.03.010
- Ojeda, E., Mendoza, E. T., Simarro, G., y Guillen, J. (2013). Video based coastal monitoring system in Sisal Yucatan. In *Integrated Water Resources Management* (pp. 1–5).
- Ojeda, E., Ruessink, B. G., y Guillen, J. (2008). Morphodynamic response of a two-barred beach to a shoreface nourishment. *Coastal Engineering*, 55(12), 1185–1196. doi:10.1016/j.coastaleng.2008.05.006
- Osorio, a. F., Medina, R., y Gonzalez, M. (2012). An algorithm for the measurement of shoreline and intertidal beach profiles using video imagery: PSDM. *Computers y Geosciences*, 46, 196–207. doi:10.1016/j.cageo.2011.12.008
- Osorio, A., Pérez, J. C., Ortiz, C. A., y Medina, R. (2007). Técnicas basadas en imágenes de video para cuantificar variables ambientales en zonas costeras. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 16, 15.
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from Gray-level. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-9(1), 62–66. doi:10.1109/TSMC.1979.4310076
- Pape, L., Plant, N. G., y Ruessink, B. G. (2010). On cross-shore migration and equilibrium states of nearshore sandbars. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(3). doi:10.1029/2009JF001501

- Plant, N. G., Aarninkhof, S., Turner, I. L., y Kingston, K. S. (2007). The Performance of Shoreline Detection Models Applied to Video Imagery. *Journal of Coastal Research*, 233(233), 658–670. doi:10.2112/1551-5036(2007)23[658:TPOSDM]2.0.CO;2
- Plant, N. G., y Holman, R. a. (1997). Intertidal beach profile estimation using video images. *Marine Geology*, 140(1-2), 1–24. doi:10.1016/S0025-3227(97)00019-4
- Pratt, W. K. (2001). *Processing Digital Image Processing* (Vol. 5).
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). (2014). ¿Que es la Zona Federal Marítimo Terrestre? Obtenido de http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/1441/1/mx/que_es_la_zona_federal_maritimo_terrestre.html
- Quartel, S., Addink, E. a., y Ruessink, B. G. (2006). Object-oriented extraction of beach morphology from video images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(4), 256–269. doi:10.1016/j.jag.2006.01.002
- Quartel, S., Kroon, a., y Ruessink, B. G. (2008). Seasonal accretion and erosion patterns of a microtidal sandy beach. *Marine Geology*, 250(1-2), 19–33. doi:10.1016/j.margeo.2007.11.003
- Quartel, S., Ruessink, B. G., y Kroon, a. (2007). Daily to seasonal cross-shore behaviour of quasi-persistent intertidal beach morphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(9), 1293–1307. doi:10.1002/esp.1477
- Quiroz, M., Delgado, V., y Burbano, C. (2009). Implementación de un algoritmo para la detección y conteo de células en imágenes microscópicas, (1). Obtenido de [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8375/1/Implementación de un algoritmo para la detección y conteo de células en imágenes microscópicas.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8375/1/Implementación%20de%20un%20algoritmo%20para%20la%20detección%20y%20conteo%20de%20células%20en%20imágenes%20microscópicas.pdf)
- Ribas, F., Ojeda, E., Price, T. D., y Guillén, J. (2010). Assessing the Suitability of Video Imaging for Studying the Dynamics of Nearshore Sandbars in Tideless Beaches. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(6), 2482–2497. doi:10.1109/TGRS.2009.2039576
- Richardson, L. L., y LeDrew, E. F. (2006). Remote sensing of aquatic coastal ecosystem processes. *Remote Sensing and Digital Image Processing*.
- Ruiz Ceballos, P. (2015). *Caracterización del Ridege and Runnel en una Playa de Ambiente Disipativo y su rol en la Dinámica Costera*. Tesis de Maestría. Universidad de Cantabria.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., y Masselink, G. (2010). Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K. *Marine Geology*, 278(1-4), 77–99. doi:10.1016/j.margeo.2010.09.004

- Sánchez-Arcilla, A., y Jiménez, J. A. (1994). Ingeniería de playas (I): conceptos de morfología costera. *Ingeniería Del Agua*, 1(2), 97–114. doi:<http://dx.doi.org/10.4995/ia.1994.2639>.
- Silva, R., Martínez, M. L., Hesp, P. a., Catalan, P., Osorio, A. F., Martell, R., ... Govaere, G. (2014). Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research*, 71, 1–16. doi:10.2112/SI71-001.1
- Souto, C. P. E. (2015). *Análisis de la dinámica de las barras a partir de imágenes de video y asociación a los espectros de energía del oleaje durante el período de campaña NCSal*. Tesis de Maestría. Universidad de Cantabria.
- Stive, M., Aarninkhof, S., y Hamm, L. (2002). Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal ...*, 47, 211–235. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383902001266>
- Stive, M. J. F., y de Vriend, H. J. (1995). Modelling shoreface profile evolution. *Marine Geology*, 126(1-4), 235–248. doi:10.1016/0025-3227(95)00080-I
- Turner, I. L. y V. M. L. (2000). *System description and analysis of shoreline change: August 1999 - February 2000. Report 1 Northern Gold Coast Coastal Imaging System*.
- Turner, I. L., y Anderson, D. J. (2007). Web-based and “real-time” beach management system. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 555–565. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.002
- Uunk, L., Wijnberg, K. M., y Morelissen, R. (2010). Automated mapping of the intertidal beach bathymetry from video images. *Coastal Engineering*, 57(4), 461–469. doi:10.1016/j.coastaleng.2009.12.002
- Van Koningsveld, M., Davidson, M., Huntley, D., Medina, R., Aarninkhof, S., Jiménez, J. a., ... de Kruif, A. (2007). A critical review of the CoastView project: Recent and future developments in coastal management video systems. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 567–576. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.006
- Wikipedia. (n.d.). HSL and HSV. Obtenido en Abril 21, 2015, de http://en.wikipedia.org/wiki/HSL_and_HSV#Joblove
- Wright, L. ., y Short, a. . (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56(1-4), 93–118. doi:10.1016/0025-3227(84)90008-2
- Zarruk, G. A., Orfila, A., Nieto, M. A., y Garau, B. (2008). SIRENA : An Open Source , Low Cost Video-Based Coastal Zone Monitoring System. *Elsevier Preprint*.

ANEXOS

Programamos múltiples subrutinas en Matlab® que realizan el proceso de detección y selección de la línea de costa, así como su rectificación. Anexo algunas de las funciones, desarrolladas para esta tesis, utilizadas para la detección de la línea de costa:

Mlc_1: genera tres matrices de bordes usando los algoritmos desarrollados. A partir de estas matrices es posible extraer la línea de costa.

Bordes: Llama a la función Mlc_1 y genera matrices de bordes empleando LoG y Canny.

Lcmt: Llama a la función bordes y extrae las líneas de costa de cada una de las matrices de bordes

Anexo 1. Función Mlc_1 programada en Matlab®

```
function [CM,CM2,CN]=Mlc_1 (IM)
%% Descripción de la función
% Extrae la línea de costa de imágenes oblicuas,
% INPUTS IM=la imagen (RGB) cargada en Matlab
% OUTPUTS [CM1 CM2]=Matriz de bordes (para utilizar con función bordes)
% *****      CM: La playa seca esta definida solo por el Hue y Sat
% *****      [0 1 ~]
% *****      CM2:Se incluye el brillo [0 0 1] en la playa
% *****      CN: Igual a CM pero utiliza el método Otsu para
encontrar umbral
% Proceso:  utiliza las bandas HSV
% elimina valores extremos de cada banda en un proceso iterativo
% en que calcula la media y la desviación estándar
% elimina el o los datos mas lejanos a la media, recalcula la media
% repite los pasos hasta quedarse con el 99% de los datos nonNaN
originales
% Recalibra cada banda respecto a el promedio aritmético
% magnificando las diferencias
% Clasifica cada banda poniendo a los valores por encima de un umbral =1
% y los menores =0.De las bandas clasificadas
% la arena tienen un patrón HSV [0 1 1]
% la vegetación (terrestre y acuática) [0 1 0]
% todo lo demás puede ser agua, otro tipo de estructuras o ruido
% Obtenemos la playa seca de la vegetación y la arena
% El resultado de esto da una matriz binaria con 1 para la playa seca y 0
% para el agua y ruido.
% Esta matriz se filtra convirtiendo los pixeles solitarios
```



```

% (que tienen una conectividad menor a 3). a su opuesto
% Este proceso de filtrado se repite 20 veces o hasta que la imagen no
% cambia más
% De la matriz filtrada se encuentran los bordes simplemente
% identificando por columna los cambios de valor
% Estos bordes representan la playa.

%% Transformar RGB a HSV
HSV=rgb2hsv(IM);

%% reajuste
PHSV=HSV;
[XY]=find((HSV(:,:,1)==0) & (HSV(:,:,2)==0) & (HSV(:,:,3)==0));

for i=1:3
P=HSV(:,:,i);
P(XY)=nan;

S=sum(isnan(P(:)));
N=length(P(:))-S;
a=nanmean(P(:));
d=nanstd(P(:));

%Filtrar hasta para obtener 99% de los datos

D=N/100;
G=2;
DT=100000;

while DT>D
[x]=find(P>(a+d*G));
[y]=find(P<(a-d*G));

DT=length(x)+length(y);

G=G+0.0001;
end

G=G-0.0001;

P(x)=a+d*G;
P(y)=a-d*G;

%% Rescalar

mn=nanmin(P(:));
mx=nanmax(P(:));
PP=(P-mn)*1/mx;
PHSV(:,:,i)=PP;

%% Binarizado

```

```

%% Otsu N Media M
level=graythresh(PP);
NC1=im2bw(PP,level);
MC1=im2bw(PP,nanmean(PP(:)));
NC(:,:,i)=NC1;
MC(:,:,i)=MC1;
end

%% Clasificación
dryB=zeros(size(NC1));

shine=zeros(size(NC1));
for t=1:2
    if t==2
        NC=MC;
    end

for i=1:size(NC,1)
    for j=1:size(NC,2)
        PV=[NC(i,j,1),NC(i,j,2),NC(i,j,3)];
        if isequal(PV,[0 1 1])
            dryB(i,j)=1;
        elseif isequal(PV,[0 1 0])

            dryB(i,j)=1;
        elseif sum(PV==[0 1 NaN])==2
            if isnan(PV(1,3))

                dryB(i,j)=1;
            end
        elseif isequal(PV,[0 0 1])

            shine(i,j)=1;

        else

            end
        end
    end
end
dryB2=dryB+shine;

%% Eliminación de pixeles solitarios

NCF=zeros(size(NC1));
NCF2=NCF;

for i=2:size(dryB,1)-1
    for j=2:size(dryB,2)-1
        MatrizL=[dryB(i-1,j);dryB(i+1,j);dryB(i,j-1);dryB(i,j+1)];
        if dryB(i,j)==0
            if sum(MatrizL)==4 || sum(MatrizL)==3
                NCF(i,j)=1;
            else
                NCF(i,j)=0;
            end
        end
    end
end

```

```

elseif dryB(i,j)==1
    if sum(MatrizL)==0 || sum(MatrizL)==1
        NCF(i,j)=0;
    else
        NCF(i,j)=1;
    end
end
MatrizL2=[dryB2(i-1,j);dryB2(i+1,j);dryB2(i,j-1);dryB2(i,j+1)];
if dryB2(i,j)==0
    if sum(MatrizL2)==4 || sum(MatrizL2)==3
        NCF2(i,j)=1;
    else
        NCF2(i,j)=0;
    end
elseif dryB2(i,j)==1
    if sum(MatrizL2)==0 || sum(MatrizL2)==1
        NCF2(i,j)=0;
    else
        NCF2(i,j)=1;
    end
end
end
end

end

%% Detección de bordes en matriz binarizada
CM=zeros(size(NC1));
CM2=CM;
for j=2:size(NCF,2)-1
    for i=3:size(NCF,1)-1
        CM(i,j)=NCF(i,j)~=NCF(i-1,j);
        CM2(i,j)=NCF2(i,j)~=NCF2(i-1,j);
    end
end
if t==1
    CN=CM;
    CN2=CM2;
end
end
end

```

Anexo 2. Subrutina bordes programada en Matlab®

```
function [varargout]=bordes (RGB)

%genera 5 matrices de bordes CM1 CM2 y CM5 mediante umbrales en HSV, 1 y
2 utilizan media, el 5 utiliza el método Otsu
%CM3 matriz de borde con LoG
%CM4 matriz de bordes con Canny

[XY]=find((RGB(:,:,1)==0) & (RGB(:,:,2)==0) & (RGB(:,:,3)==0)); %en revision

[CM1,CM2,CM5]=M1c_1 (RGB);
HSV=rgb2hsv (RGB);
for i=1:3
    P=double (HSV(:,:,i));
    P(XY)=nan;
    HSVn(:,:,i)=P;
end
CM3=edge (HSV(:,:,3), 'log');

CM4=edge (HSVn(:,:,3), 'canny', 0.4);

varargout={CM1,CM2,CM3,CM4,CM5,CMP};
```

Anexo 3. Función lcmt programada en Matlab®.

```
function [XF,YF,EE]=lcmt (RGB)
% función utilizada para llamar la función bordes la cual genera imágenes
% de bordes con 5 métodos, y encontrar la línea de costa de la matriz de
% bordes
% Se determina como línea de costa la línea mas continua que
% pueda trazarse con los bordes. Este decisión se toma seleccionando cada
% uno de los primeros pixeles de borde de la primer columna y
% seleccionando como la siguiente posición el valor de borde mas cercano
% en Y.
% Al final de las n líneas obtenidas se toma la línea cuyos saltos de
pixel en pixel fueron menores utilizando el indicador ee.
EE=[];

[CM1,CM2,CM3,CM4,CM5]=bordes (RGB);

for t=1:5
    g=num2str(t);

    eval(['CM=CM',g,';'])

    it=2;
    P=find(CM(:,2));
    while isempty(P) % sirve para evitar errores cuando la primera fila
no hay bordes
        it=it+1;

        P=find(CM(:,it));

    end
    LN=NaN(length(P),size(CM,2)-(it));
    clear mdf
    for i=1:sum(CM(:,it))
        P0=P(i);
        lnc=[NaN,P0];
        for j=it+1:size(CM,2)
            pu=find(CM(:,j));
            if isempty(pu)
                lnc(j-it)=NaN;
                continue
            else
                dif=abs(pu-P0);
                [~,y]=min(dif);
                lnc(j-it)=pu(y);
                df(j-it)=y;
                P0=lnc(j-it);
            end
        end

        end
        LN(i,:)=lnc;
        mdf(i,:)=df;
    end
    eval(['LN',g,'=LN;'])
```

```

    eval(['mdf',g,'=mdf;'])

%
[~,I]=min(sum(mdf,2));
eval(['LC',g,'=LN(I,:);'])
eval(['Vx',g,'=it+1:length(LC',g,')+it;'])
ee(t,:)=min(sum(mdf,2))/length(mdf);

end

EE=[EE;ee'];
YF={LC1;LC2;LC3;LC4;LC5};
XF={Vx1;Vx2;Vx3;Vx4;Vx5};

% graficar
figure
imshow(RGB)
color=['brgcykmw'];
hold on
for i=1:5

eval(['plot(Vx',num2str(i),'LC',num2str(i),'color(',num2str(i),'))'])
end

```