



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Sistema de monitoreo de estructuras portuarias mediante análisis de imágenes (modelo hidráulico)

Noé Fabricio Toledano Vega
Rodolfo Ramírez Xicotencatl
María de Lourdes Méndez Reyes
Manuel Mendoza Grande
David Segura Quiroz

Publicación Técnica No. 714
Querétaro, México.
2022

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, por el Ing. Noé Toledano Vega, Ing. Rodolfo Ramírez Xicotencatl, Ing Arq. María de Lourdes Méndez Reyes, Ing. Manuel Mendoza Grande y del ISC. David Segura Quiroz.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna VI-05/22, con el nombre de “Sistema de monitoreo de estructuras portuarias y costeras mediante análisis de imágenes. Etapa 1: Modelo hidráulico en el Laboratorio de Hidráulica Marítima”.

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	1
1. Adecuación del modelo físico.....	3
2. Implementación del sistema de monitoreo.....	7
3. Definición de la metodología para el sistema de análisis.....	11
3.1 Método de DTL.....	11
3.1.1 Rectificación métrica.....	12
3.1.2 Transformaciones proyectivas Bidimensionales.....	13
3.2 Caracterización de las transformaciones proyectivas bidimensionales.....	13
3.2.1 Transformación Isométrica (Euclídea).....	14
3.2.2 Transformación Afín.....	14
3.2.3 Transformación Descriptiva General.....	14
4. Procesamiento y post procesamiento de imágenes digitales.....	17
4.1 Registro de imagen.....	17
4.2 Clasificación de los algoritmos para el registro de imágenes.....	17
4.2.1 Basados en la intensidad versus características.....	17
4.2.2 Modelos de transformación.....	18
4.2.3 Modelos de dominio espacial vs frecuencia.....	18
4.2.4 Métodos monomodal vs multimodal.....	19
4.2.5 Métodos automáticos vs interactivos.....	19
4.3 Incertidumbre.....	19

4.4	Implementación del sistema para el registro de imágenes	20
5.	Resultados de la implementación del sistema.....	29
5.1	Procesamiento de las imágenes digitales registradas.....	29
5.1.1	Imágenes RGB.....	29
5.1.2	Escala de grises.....	29
5.1.3	Binarización.....	30
5.2	Procesamiento de las imágenes por medio del modelo RGB.....	30
5.2.1	Cálculo de las áreas de la deformación de la estructura.....	37
	Conclusiones.....	43
	Bibliografía	45

Sinopsis

En el presente estudio se desarrolló la metodología para cuantificar a través de fotografías digitales tomadas de ensayos en modelos hidráulicos, los volúmenes correspondientes a la deformación de las estructuras de protección portuaria y costera sujetas a la acción del oleaje.

Como primer punto, se implementó el sistema para la toma de imágenes digitales de alta resolución en calidad 4K, por lo que, fue necesario adecuar las ventanas de observación del canal de olas del Laboratorio de Hidráulica Marítima a fin de eliminar los reflejos, sombras brillos que afectan la calidad de las fotografías.

Posteriormente, se desarrolló con el software Matlab, el algoritmo que permite rectificar y transformar las imágenes mediante la técnica denominada Registro de imagen con el método Nonreflective Similarity y mediante el análisis de los canales RGB (rojo, verde y azul por sus siglas en inglés) de las imágenes transformadas se calcula las áreas de la deformación de la estructura ensayada.

Con el algoritmo y la metodología desarrollada es posible realizar algún otro tipo de análisis como pudiera ser:

- Determinación del Run-up y run-down del oleaje, y
- Cálculo del Overtopping (rebase del oleaje por encima de la corona de las estructuras de protección portuaria y costera).

Abstract

In this study, the methodology was developed to quantify through digital pictures taken from tests in hydraulic models, the volumes corresponding to the deformation of port and coastal protection structures subject to wave action.

As a first point, the system for taking high-resolution digital pictures in 4K quality was implemented, therefore, it was necessary to adapt the channel's observation windows of the Maritime Hydraulics Laboratory in order to eliminate reflections, shadows, glare that affect the quality of the pictures.

Subsequently, the algorithm that allows rectifying and transforming the images using the technique called Image Registration with the Nonreflective Similarity method and by analyzing the RGB channels (red, green and blue) was developed with the Matlab software. From the transformed images, the deformation areas of the tested structure are calculated.

With the algorithm and the methodology developed, it is possible to carry out some other type of analysis, such as:

- Run-up and run-down of the waves, and
- Overtopping (rate of overflow of the waves above the crown of the port and coastal protection structures).

Introducción

La ingeniería portuaria, en ocasiones se enfrenta a la solución de problemas en los que se ve involucrado el movimiento de la línea de costa o bien, daños en estructuras costeras de los puertos.

Por un lado, las costas son espacios naturales esenciales que funcionan como infraestructura natural que, junto con las estructuras construidas por el hombre, en conjunto proporcionan protección ante las inclemencias de los temporales e indudablemente permite sustentar la seguridad y la economía de las regiones costeras y la conservación de los ecosistemas.

Las costas y las estructuras marítimas están sujetas a la incesante acción del oleaje y de las corrientes marinas por lo que su interacción genera cambios en la forma de una playa, o daños en las estructuras marítimas. Estos procesos evolutivos provocan cambios en la morfología de las costas, y consecuentemente daños a la infraestructura asentada en las franjas costeras, impactando social y económicamente a una región.

En este sentido, en los últimos años se ha identificado la necesidad de realizar el monitoreo de forma continua de los cambios morfológicos de la línea de costa o la cuantificación de daños cuando una estructura resulta dañada.

Por lo anterior, el IMT plantea este estudio, en el que se considera que su desarrollo nos permitirá dar seguimiento y analizar mediante el uso de imágenes, la deformación de una estructura o la evolución de la línea de playa, que monitoreará sus cambios de tal manera que podamos evaluar su comportamiento.

Para este fin, el IMT pretende realizar como una primera etapa, la puesta en operación de un sistema de video cámaras de alta resolución que será instalado en el canal angosto del Laboratorio de Hidráulica Marítima. Las cámaras grabarán de forma permanente y sistemática los ensayos que se realizarán a una estructura marítima de protección, con objeto de validar una metodología que defina la implementación de un sistema de generación y procesamiento de imágenes, cuyo análisis

permitirá monitorear y evaluar la deformación de las estructuras marítimas que se estudien posteriormente en el laboratorio.

Los canales y tanques del Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT, provistos de un sistema generador de oleaje regular e irregular que permite reproducir las condiciones de oleaje irregular requeridas para los ensayos.

En etapas futuras, se contempla que el sistema de análisis de imágenes implementado en este proyecto se instale en campo en alguna zona de estudio que le sea requerida a la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera, ya sea para monitorear la evolución de la línea de costa, o bien, el comportamiento de alguna estructura costera.

Esta primera etapa del proyecto se desarrollará dentro del marco de los conceptos que integran al Plan Nacional de Desarrollo 2019 – 2024, en su objetivo 3.6 "Desarrollar una infraestructura de transporte accesible con enfoque multimodal (ferroviario, aeroportuario, transporte marítimo, transporte masivo), sostenible, a costos competitivos y accesibles que amplíe la cobertura de transportes nacional y regional", así como la estrategia 3.6.3 "Desarrollar una red de comunicaciones y transportes accesible, segura, eficiente, sostenible y moderna, con visión de desarrollo regional y de redes logísticas que conecte a todas las personas, facilite el traslado de bienes y servicios, y que contribuya a salvaguardar la seguridad nacional".

1. Adecuación del modelo físico

Los modelos físicos de oleaje, hoy en día, son herramientas que ayudan a conocer la realidad a una escala reducida. Estos modelos toman en cuenta las simplificaciones e hipótesis que se requieren para la escala reducida. Para la generación de oleaje, se requiere de un sistema de cómputo que controla las paletas de generación, con el cual se producirá dicho oleaje con las condiciones que se requieran para su análisis.

Para el caso de estudio, se utilizó en canal de olas angosto, dicho canal se encuentra en las instalaciones del Instituto Mexicano del transporte, el cual consta de las siguientes partes para generar el oleaje:

La operación del modelo hidráulico se utilizó una computadora PC en la cual se genera un archivo de señales digitales de oleaje irregular basadas en dos espectros (uno de tipo Bretschneider-Mitsuyasu y el otro de tipo JONSWAP), estos datos se convierten a datos analógicos (variaciones de voltaje) y se envían a un generador de oleaje producido con el espectro de energía pistón, como se indica en la figura 1.1.



Figura 1.1 Equipo utilizado para la generación, medición y análisis de oleaje

Para la medición de la altura de ola del modelo hidráulico en el canal de olas se utilizaron sensores de oleaje generado con el espectro de energía resistivo de ± 5 volts de resolución, colocados uno a una distancia de 1.5 veces la longitud de la ola frente a la estructura y el segundo a 50 cm del primero, esto con objeto de medir la altura de ola incidente tal como se muestra en la figura 1.2.



Figura 1.2 Colocación de los sensores de medición de oleaje para los ensayos en modelo hidráulico en el canal de olas angosto

Para la realización del presente proyecto se llevó a cabo la construcción del modelo hidráulico de estabilidad estructural para la verificación del porcentaje de vacíos permisible, en el Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT. Dicha construcción consistió en la adecuación del canal de olas de 50 m de largo, 0.60 m de ancho (canal angosto).

La adecuación del canal de olas ancho consistió en la construcción de la configuración batimétrica del perfil longitudinal de las secciones diseñadas con anterioridad y se consideró el trazo de la pendiente de la losa de fondo existente en dicho canal de olas ($S=0.031$).

El procedimiento para la construcción del modelo hidráulico en el canal de olas fue el siguiente:

- a) Se realizó el trazo en las ventanas de observación del canal de olas de la configuración batimétrica de las secciones transversales a ensayar.
- b) Sobre las caras interiores de los muros del canal de olas se verificó el trazo y la nivelación de la pendiente del fondo marino existente.
- c) Una vez verificado el trazo de la pendiente del fondo marino, se realizó el relleno a base de grava hasta los niveles indicados.
- d) Para el caso en particular de este estudio, la pendiente del fondo marino fue colocada a base de grava y de dos placas de acero de 3 mm de espesor.

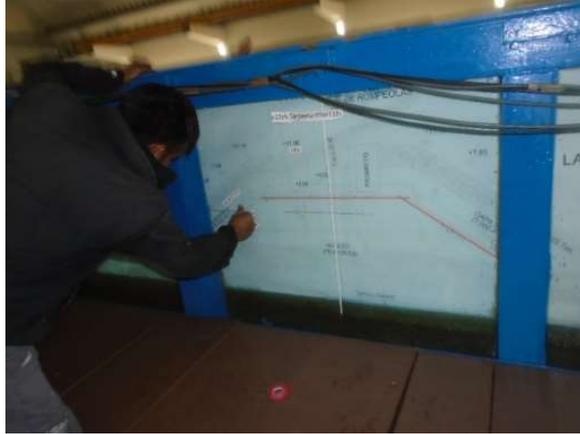


Figura 1.3 Trazo de las secciones en las ventanas de observación del canal de olas



Figura 1.4 Colocación de gravilla y grava (a la escala seleccionada) para la formación del núcleo y de la capa secundaria



Figura 1.5 Colocación de la coraza de la sección con elementos prefabricados



Figura 1.6 Colocación de la coraza con Cubo ranurado

2. Implementación del sistema de monitoreo

Para el estudio del sistema de monitoreo de estructuras portuarias y costeras mediante análisis de imágenes, etapa 1, se desarrolló en el modelo hidráulico dentro del Laboratorio de Hidráulica Marítima, con la implementación de una cámara de alta resolución con tecnología 4K, de 3840×2160 píxeles, donde fue necesario definir el ángulo y lado del canal angosto idóneo para obtener las imágenes a procesar.



Figura 2.1 Canal angosto del Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT

De forma inicial, se hicieron pruebas de ajuste de posición de cámara en ambos lados del canal angosto, A y B, como se muestra en la figura 2.1, para evitar los reflejos de la luz natural, objetos, sombras y ruido en la captura de imágenes, y el resultado fuera favorable, para ello, se cubrieron los ventanales, para impedir el paso de la luz hacia el canal, y a su vez se colocó un reflector para contar con una luz artificial, permitiendo iluminar el cuadro de captura (figura 2.2).



Figura 2.2 Obstrucción de ventanas y colocación de reflector en el canal angosto

A continuación, se inició con la prueba del lado B del canal, fue necesario cubrir el lado opuesto del canal con un material claro que resaltara la estructura y posteriormente obstruir el paso de la luz con un material oscuro, los resultados de la prueba del lado B fueron desfavorables, como se puede observar en la figura 2.3, donde se perciben objetos reflejados en el cristal, luces provenientes de los ventanales, sombras que no permiten apreciar el agua de forma uniforme, lo cual causa ruido en la toma requerida, esto produjo que el lado B se descartara, ya que no era viable para el estudio requerido.



Figura 2.3 Resultados de la prueba de imágenes en el lado B del canal

Una vez que se obtuvieron los resultados anteriores, se inició la preparación del canal para la prueba del lado A del canal, se obstruyó el paso de la luz natural y sustituyéndola por una luz artificial, los resultados que se obtuvieron en esta toma fueron viables, como se observa en la figura 2.4, el fondo blanco permitió que el modelo resaltara, sin contener reflejos y sombras que comprometieran la imagen, y tuviera una vista uniforme al cuadro de captura.



Figura 2.4 Resultados de la prueba de imágenes en el lado A del canal

De los dos pruebas realizadas, se seleccionó el lado A del canal para colocar la cámara, siendo este lado el que obtuvo los resultados más favorables para los requisitos del estudio, la cámara se posicionó en un lugar fijo, a una distancia aproximada de 2 m del canal, donde permanecerá durante el transcurso del ensayo, centrada en un eje focal, ubicado al centro del modelo de forma vertical a la estructura (figura 2.5) donde se tomó como referencias las líneas guías que se encuentran adheridas al cristal.



Figura 2.5 Eje focal y líneas guías de la estructura

3. Definición de la metodología para el sistema de análisis

México cuenta (tanto en el Golfo y el Pacífico) con varios puertos, los cuales están protegidos con obras de protección, como pueden ser: rompeolas, escolleras, espigones, rompeolas separados de la costa, etc.

Los efectos meteorológicos extremos que llegan a México, ha generado problemas en las estructuras de protección portuaria, en este sentido, en los últimos años se ha identificado la necesidad de realizar el monitoreo de forma continua de los cambios morfológicos de la línea de costa o la cuantificación de daños cuando una estructura resulta dañada.

Los cambios mencionados en el párrafo anterior, se van a utilizar sistemas de monitoreo a través de imágenes. Una imagen, se define como una figura de algo o de alguien o la representación de la realidad, es así que una imagen digital es una representación bidimensional de una imagen y puede ser tratada como una imagen matricial (un mapa de bits) o de píxeles.

La mayoría de las imágenes digitalizadas están compuestas de atributos, como son: dimensión de la imagen y el tipo de codificación. El pixel se refiere a un área pequeña de una imagen. Las cámaras, hoy en día, tienen sensores que ayudan a crear una imagen que tiene una definición muy nítida. Existen varios métodos que se deben de tomar en cuenta en el análisis de imágenes digitalizadas, las cuales son: El método de DTL y el de rectificación métrica.

3.1 Método de DTL

El método la Transformación Lineal Directa (DTL), fue desarrollado por Holman (Holland, 1997), el cual ayuda para la rectificación de la cámara y es útil para la estimación de los coeficientes de distorsión.

Para ello es necesario representar la imagen en coordenadas tridimensionales (x, y, z) y en coordenadas bidimensionales (u, v) en ese mismo punto. La distancia que se encuentra del plano de la imagen al centro del obturador de la cámara (X_c, Y_c, Z_c) se le conoce como longitud efectiva focal f .

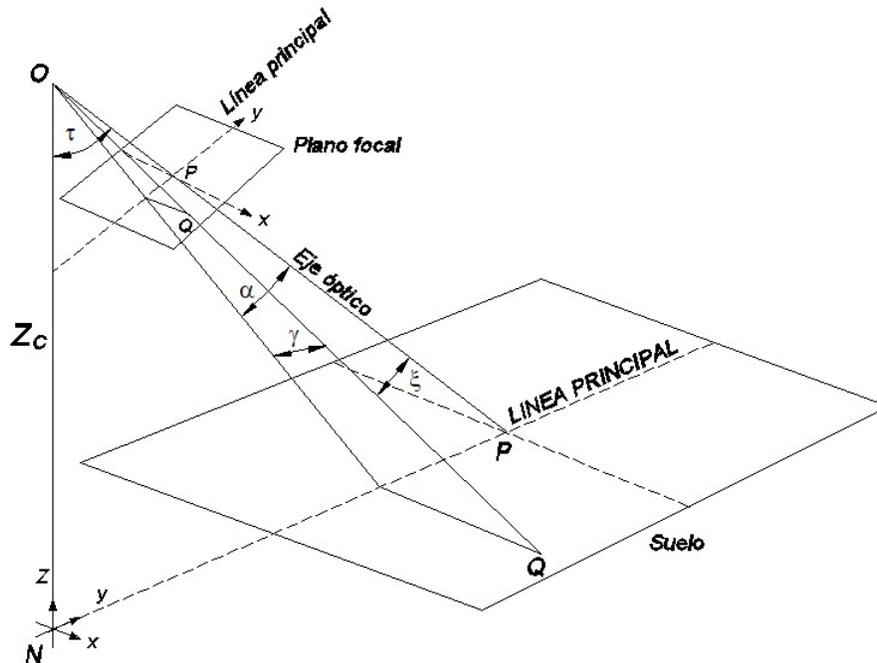


Figura 3.1 Plano de los ángulos de la cámara

El centro de la imagen es representado por las coordenadas (U_0, V_0) , y utilizamos los términos de la figura 3.1, las coordenadas reales y las de transformación de una imagen puede ser a través de la ecuación de colinealidad (las líneas rectas son vistas como líneas rectas), se toma como principio el obturador de la cámara, el punto de la imagen y la distancia en línea recta al objeto.

Las ecuaciones de colinealidad sirven para modelar la distorsión de la cámara y al resolverlas, se pueden determinar los parámetros que relacionan a la imagen con el punto de control. Dichas ecuaciones son no lineales. Los parámetros de la ecuación pueden ser combinados para resolver la relación entre la imagen y las coordenadas reales.

3.1.1 Rectificación métrica

Otra parte importante es la rectificación de una imagen, para ello se utiliza el método de rectificación métrica, este método ayuda, a través de transformaciones proyectivas en un plano, sea posible modelar la distorsión geométrica (Liebowitz, 1998), para ello se conservan las propiedades de colinealidad y otras no (las líneas paralelas no son vistas como líneas paralelas). Para la representación matemática se utilizan relaciones algebraicas, y con ellas, se implementan algoritmos las cuales se pueden resolver a través de programas computacionales (ver fig 3.2).

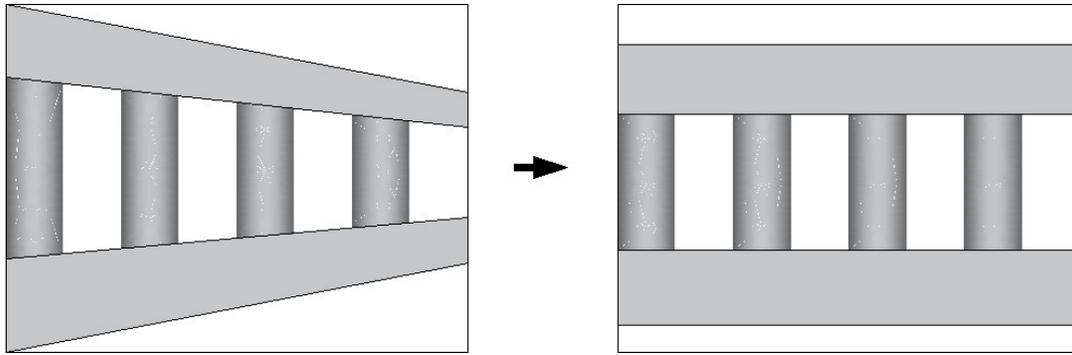


Figura 3.2 Ejemplo de una rectificación

Este método, lo que hace es representar en coordenadas bidimensionales (x, y) en \mathbb{R}^2 (comúnmente se identifica en un plano). \mathbb{R}^2 se puede considerar como un espacio vectorial en el que (x, y) es un vector.

Los puntos en un plano pueden ser representados por vectores homogéneos tridimensionales, en donde los dos primeros elementos son las coordenadas en un punto y el tercer elemento es 1.

3.1.2 Transformaciones proyectivas Bidimensionales

Se define como la transformación proyectiva bidimensional como el estudio de las propiedades del plano proyectivo \mathbf{P}^2 que son invariantes a través de transformaciones conocidas como proyectivas. La proyectividad es una transformación invertible, de tal manera una línea recta es transformada como una línea recta. La proyectividad se define como:

$$h(x) = x' = Hx$$

en donde H es una matriz de 3×3 . Entonces, se dice que m' es la transformación lineal H de m , por lo cual, dicha transformación es biunívoca entre dos planos bidimensionales, y sus puntos son representados por m y m' , es decir, que un punto en un plano bidimensional solo corresponde ese punto a otro plano.

3.2 Caracterización de las transformaciones proyectivas bidimensionales

Para la caracterización, se pueden dividir en cuatro categorías de transformaciones proyectivas $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, dichas categorías son:

1. Transformación Isométrica (Euclídea)
2. Transformación de Similitud

3. Transformación Afín
4. Transformación Proyectiva General

3.2.1 Transformación Isométrica (Euclídea)

La transformación isométrica conserva la distancia Euclídea, o sea, que la distancia entre dos puntos es igual a la distancia entre los puntos transformados. Dicha transformación se puede representar en la figura 3.3 y corresponde a la transformación de coordenadas $(x', y') \rightarrow (x, y)$.

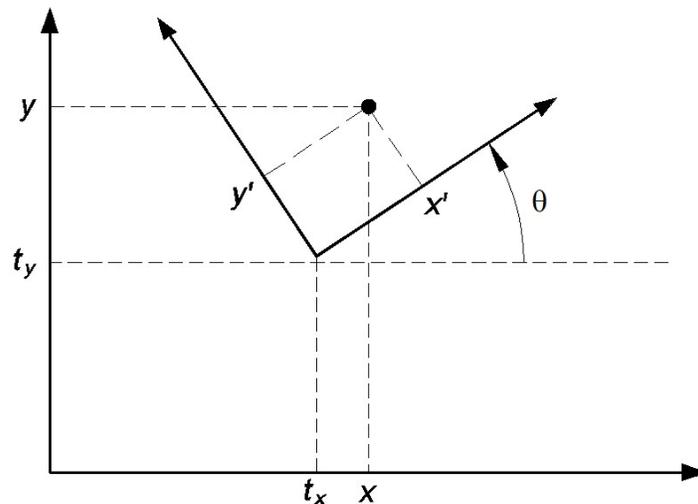


Figura 3.3 Transformación bidimensional isométrica

Las invariantes de la transformada, se refiere a que sus propiedades se mantienen después de aplicar la transformación isométrica (longitud entre los puntos, ángulo entre dos rectas y su área).

3.2.2 Transformación Afín

La transformación Afín es la que distorsiona la forma de los objetos e introduce una matriz de 2×2 A no ortogonal en lugar de R . Las invariantes de esta transformación son: líneas paralelas y la razón de entre dos áreas.

3.2.3 Transformación Descriptiva General

Esta transformación se refiere a la generalización de las transformaciones lineales $R^2 \rightarrow R^2$, en donde las líneas paralelas no son transformadas como ellas. La transformación se expresa en coordenadas homogéneas y están representados en una matriz de 3×3 . La invariante de esta transformada es la de razón de cruz.

Hay que tomar en cuenta que las invariantes de un grupo inferior pueden heredar a de un grupo superior, mas no a la inversa, es decir, la conservación de las líneas paralelas es invariante de las tres transformaciones (Euclídea, similitud, afin), y la longitud entre dos puntos solo es invariante a la Euclídea. En la figura 3.4, se muestran las distintas transformaciones que se pueden aplicar a una figura geométrica cuadrada.

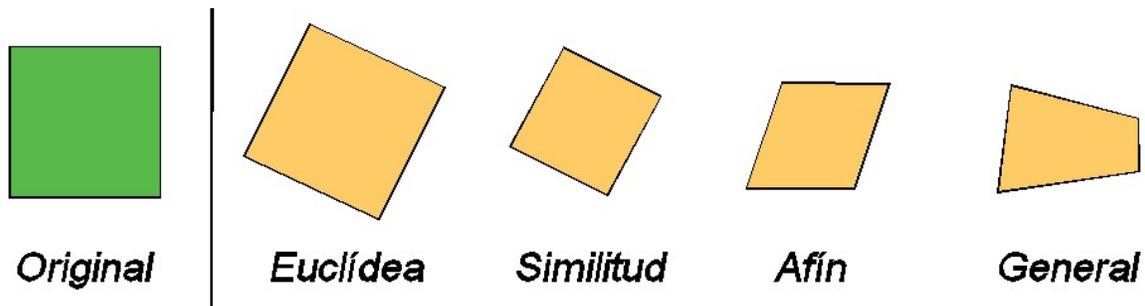


Figura 3.4 Transformaciones descriptivas bidimensionales

En el caso de la geometría descriptiva de una línea P^1 , es similar a la de un plano. La línea está representada por una matriz homogénea de 2×2 , donde \hat{x} está representada por el vector $(x_1, x_2)^T$, y se puede representar de la siguiente manera:

$$\hat{x}' = H_{2 \times 2} \hat{x}$$

En la figura 3.5, se muestran las propiedades del ajuste que puede ser calculado por una línea. Si sus propiedades son conocidas pueden ser utilizadas para determinar puntos y líneas en el infinito. Al utilizar dos intervalos en una línea con ángulo conocido, el punto en el infinito en una línea puede ser calculada. Un ejemplo típico es el de 3 puntos (a' , b' , y c') son ajustados en una línea sobre la imagen, si a , b y c son puntos colíneales en los puntos correspondientes de la línea, es posible encontrar el punto de fuga al utilizar el punto de cruz, este procedimiento se describe a continuación:

- Medir la distancia del radio a la imagen.
- Los puntos a , b y c , son representados en coordenadas o , a y $a+b$ en una coordenada en la línea de la imagen (a , b y c).
- Se calcula la transformación proyectiva unidimensional en las coordenadas de la imagen.

El resultado de los puntos de fuga se muestran en la figura 3.5.

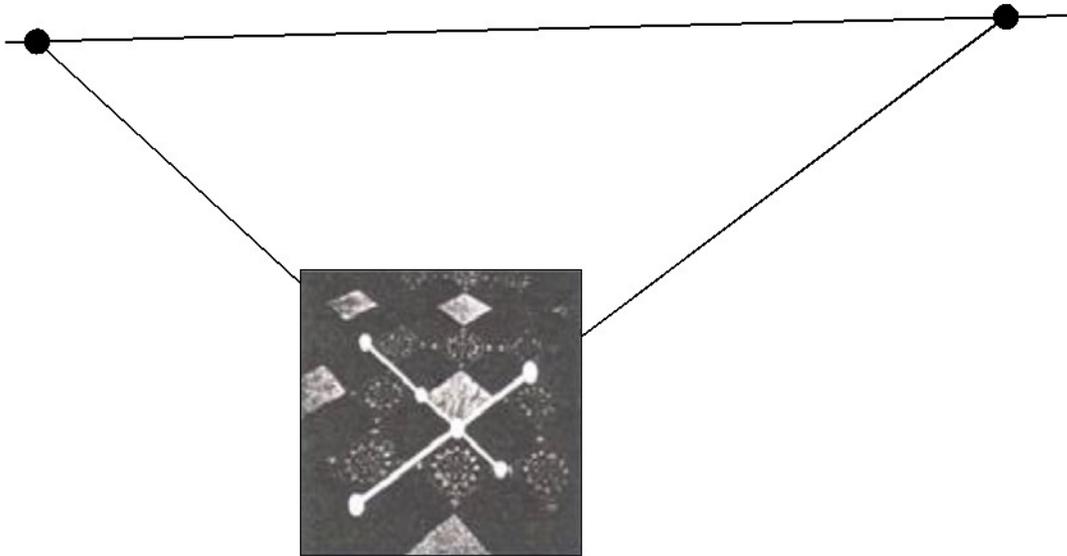


Figura 3.5 Ejemplo para la utilización de la ecuación de longitud de radios

4. Procesamiento y post procesamiento de imágenes digitales

El procesamiento de las imágenes digitales obtenidas de las series temporales del ensayo en el modelo hidráulico se realizó mediante la técnica denominada registro de imágenes.

4.1 Registro de imagen

El registro de imágenes es el proceso de transformación de diferentes conjuntos de datos a un sistema de coordenadas, el cual es necesario para poder comparar o integrar los datos obtenidos de estas diferentes mediciones.

4.2 Clasificación de los algoritmos para el registro de imágenes

4.2.1 Basados en la intensidad versus características

Los algoritmos para el registro o alineación de imágenes se pueden clasificar en basados en intensidad y basados en características. Una de las imágenes es conocida como la referencia o fuente y la segunda imagen es conocida como objetivo o detectada, el registro de la imagen consiste en la transformación espacial de la imagen de destino para alinearla con la imagen de referencia.

Los métodos basados en la intensidad, comparan los patrones de intensidad en las imágenes a través de métricas de correlación, mientras que los métodos basados en las características, encuentran la correspondencia entre las características de las imágenes, tales como puntos, líneas y contornos.

Una vez conocida la correspondencia entre varios puntos en las imágenes, se determina una transformación para mapear la imagen objetivo a las imágenes de referencia, se estableció punto por punto la correspondencia entre las imágenes de referencia y la de objetivo.

4.2.2 Modelos de transformación

La primera categoría de modelos de transformación incluye las transformaciones lineales que son: la traslación, rotación, escalamiento y otras transformaciones afines. Las transformaciones lineales son de naturaleza global, por lo tanto, no pueden modelar diferencias geométricas locales entre las imágenes.

La segunda categoría de transformaciones, permiten transformaciones "elásticas" o "no rígidas", estas transformaciones son capaces de deformar localmente la imagen objetivo para alinearla con la imagen de referencia. Las transformaciones no rígidas incluyen las funciones de base radial (splines de placa delgada o de superficie, multicuádras y las transformaciones soportadas compactadamente), modelos físicos continuos (líquidos viscosos) y los modelos de grandes deformaciones (difeomorfismos).

4.2.3 Modelos de dominio espacial vs frecuencia

Los métodos espaciales operan en el dominio de la imagen, los cuales hacen coincidir los patrones de intensidad o las características de las imágenes. Algunos de los algoritmos que emparejan características son derivaciones de las técnicas tradicionales para realizar el registro manual de la imagen, en el que un operador decide los correspondientes puntos de control en las imágenes. Cuando el número de puntos de control supera el mínimo requerido para definir el modelo de transformación apropiado, los algoritmos iterativos como RANSAC (RANDOM SAMple Consensus) se pueden utilizar para estimar robustamente los parámetros de un tipo particular de transformación (por ejemplo, afín) para el registro de las imágenes.

Los métodos en el dominio de la frecuencia encuentran los parámetros de transformación para el registro de las imágenes mientras trabajan en el dominio de transformación, estos métodos trabajan por simple transformación, tales como la traslación, la rotación y el escalamiento. La aplicación del método correlación de fase a un par de imágenes produce una tercera imagen que contiene un solo pico. La ubicación de este pico corresponde a la traslación relativa entre las imágenes. A diferencia de muchos algoritmos en el dominio espacial, el método de correlación de fase es insensible al ruido, las oclusiones y otros defectos típicos de las imágenes médicas o por satélite. Además, la correlación de fase utiliza la transformada rápida de Fourier para calcular la correlación cruzada entre las dos imágenes, lo que por lo general resulta en grandes mejoras en el rendimiento. Este método puede ser extendido para determinar la

rotación y las diferencias de escala entre dos imágenes convirtiendo, en primer lugar, las imágenes a coordenadas polares logarítmicas. Debido a las propiedades de la Transformada de Fourier, los parámetros de rotación y de escalamiento se pueden determinar de forma invariable a la traslación.

4.2.4 Métodos monomodal vs multimodal

Otra clasificación se puede hacer entre los métodos monomodales y los multimodales. Los métodos monomodales tienden a registrar las imágenes en la misma modalidad adquirida por el único tipo de sensor, mientras que los métodos de multimodales tienden a registrar las imágenes obtenidas por diferentes tipos de sensores.

4.2.5 Métodos automáticos vs interactivos

Los métodos de registro se pueden clasificar en función del nivel de automatización que ofrecen. Se han desarrollado métodos manuales, interactivos, semi-automáticos y automáticos. Los métodos manuales proporcionan herramientas para alinear las imágenes de forma manual. Los métodos interactivos reducen el sesgo del usuario mediante la realización de ciertas operaciones claves de forma automática mientras que todavía confían en que el usuario guíe el registro. Los métodos semiautomáticos realizan más pasos de registro de forma automática, pero dependen del usuario para verificar la corrección de un registro. Los métodos automáticos no permiten la interacción del usuario y realizan todos los pasos del registro de forma automática.

4.3 Incertidumbre

Hay un nivel de incertidumbre asociado con el registro de las imágenes que tienen cualquier diferencia espacio – temporal. Un registro confiable con una medida de incertidumbre es fundamental para muchas aplicaciones de detección de cambios tales como el diagnóstico médico.

En las aplicaciones de teledetección en las que un píxel de imagen digital puede representar varios kilómetros de distancia en el espacio (por ejemplo, en las imágenes LandSat de la NASA), un registro de la imagen incierto puede significar que una solución podría estar a varios kilómetros de la realidad del terreno. Varios artículos notables han tratado de cuantificar la incertidumbre en el registro de imágenes con el fin de comparar los resultados, sin embargo, muchos métodos para cuantificar la incertidumbre o estimar las deformaciones son computacionalmente

intensivos o sólo se aplican a conjuntos limitados de transformaciones espaciales.

4.4 Implementación del sistema para el registro de imágenes

En el presente estudio, el procesamiento de la información consistió en realizar el registro de imágenes instantáneas tomadas en diferentes tiempos durante los ensayos en el modelo hidráulico en una imagen a escala de la sección transversal de la estructura de protección, obtenida del modelo realizado en el software AutoCAD. El registro de las imágenes se realizó con las herramientas para el procesamiento de imágenes (Image Processing Toolbox) del software Matlab, mediante el mapeo de puntos.

Como primer paso, es leer las imágenes (referencia y objetivo) en el entorno de trabajo de Matlab, la imagen referencia es una imagen de la sección transversal del rompeolas a escala 1:64 (correspondiente al modelo hidráulico), en blanco y negro, y la imagen objetivo es una fotografía instantánea tomada de los videos del ensayo, sin correcciones geométricas: incluye la perspectiva de la cámara y distorsiones internas debidas a la lente, es una imagen RGB de color visible.

Debido a que es posible analizar diferentes imágenes obtenidas en diferentes tiempos de la duración del ensayo, el proceso para el registro de las imágenes se puede hacer de manera iterativa, sin embargo, el mapeo de los puntos de control solamente se haría una vez, siempre y cuando no se mueva la cámara.

El siguiente código permite la extracción de la primera imagen del video (imagen objetivo, figura 4.1), y lee la imagen de referencia, las cuales servirán para hacer el mapeo de los puntos de control.

```
[FileName Path] = uigetfile({'*.mp4'; '*.MOV'}, 'CARGAR VIDEO');  
vidObj = VideoReader(strcat(Path, FileName));  
frame20 = read(vidObj, 1);  
[FileName2 Path2] = uigetfile({'*.png'; '*.txt'}, 'CARGAR IMAGEN O ARCHIVO  
DE REFERENCIA');  
frame20P = imread(strcat(Path2, FileName2));
```



Figura 4.1 Imagen inicial que se utilizará como objetivo en el procesamiento de las imágenes digitales

El módulo de Image Processing Toolbox proporciona una herramienta interactiva, llamada Control Point Selection Tool, que permite seleccionar pares de puntos de control correspondientes en ambas imágenes, dichos puntos de control son puntos de referencia que puede encontrar en ambas imágenes, que en este caso corresponde al trazo de la sección transversal de la estructura de protección.

Caber señalar que, la imagen objetivo es una imagen RGB y debido a que la herramienta de selección de puntos de control solo acepta imágenes en escala de grises, la función `cpselect` solamente pasa un plano del color de la imagen.

```
cpselect(frame20(:,:,1),frame20P);
```

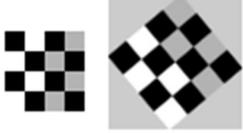
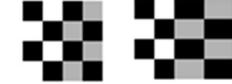
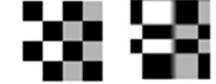
La función `cpselect` despliega dos vistas de la imagen referencia (ventana del lado derecho) y la imagen objetivo (ventana del lado izquierdo) en las que se puede elegir los pares de puntos de control (ver figura 4.2).



Figura 4.2 Módulo de la función `cpselect` del software Matlab que permite seleccionar los puntos de control

La cantidad de pares de puntos de control elegidos, está determinada, al menos parcialmente, por el tipo de transformación que se desea realizar, Matlab admite 6 tipos de transformación, las cuales se indican de acuerdo al orden de complejidad en la tabla 4.1, las primeras cuatro transformaciones (nonreflective similarity, affine, projective y polynomial) son transformaciones globales, en las cuales se aplica una sola expresión matemática a la imagen completa, mientras que las dos últimas transformaciones (piecewise linear y lwm) son transformaciones globales, en este tipo de transformaciones se aplican diferentes expresiones matemáticas a diferentes regiones de la imagen.

Tabla 4.1 Métodos de transformación disponibles en Matlab para el registro de las imágenes

Tipo de transformación	Descripción	Puntos de control mínimos	Ejemplo
nonreflective similarity	Esta transformación se utiliza cuando las formas de la imagen de entrada no han cambiado, pero la imagen está distorsionada por alguna combinación de traslación, rotación y escala..	2 pares	
affine	Esta transformación se utiliza cuando las formas de la imagen de entrada muestren cizallamiento. Las líneas rectas permanecen rectas, y las líneas paralelas permanecen paralelas, pero los rectángulos se convierten en paralelogramos.	3 pares	
projective	Esta transformación se utiliza cuando la escena aparezca inclinada. Las líneas rectas permanecen rectas, pero las líneas paralelas convergen hacia puntos de fuga (que pueden o no caer dentro de la imagen).	4 pares	
polynomial	Esta transformación se utiliza cuando los objetos de la imagen sean curvos. Cuanto mayor sea el orden del polinomio, mejor será el ajuste, pero el resultado puede contener más curvas que la imagen base.	6 pares (orden 2) 10 pares (orden 3) 16 pares (orden 4)	
piecewise linear	Esta transformación se utiliza cuando partes de la imagen aparecen distorsionadas de manera diferente.	4 pares	
lwm	Esta transformación (media ponderada local) se utiliza cuando la distorsión varía localmente y la transformación piecewise linear no es suficiente.	6 pares (se recomiendan 12 pares)	

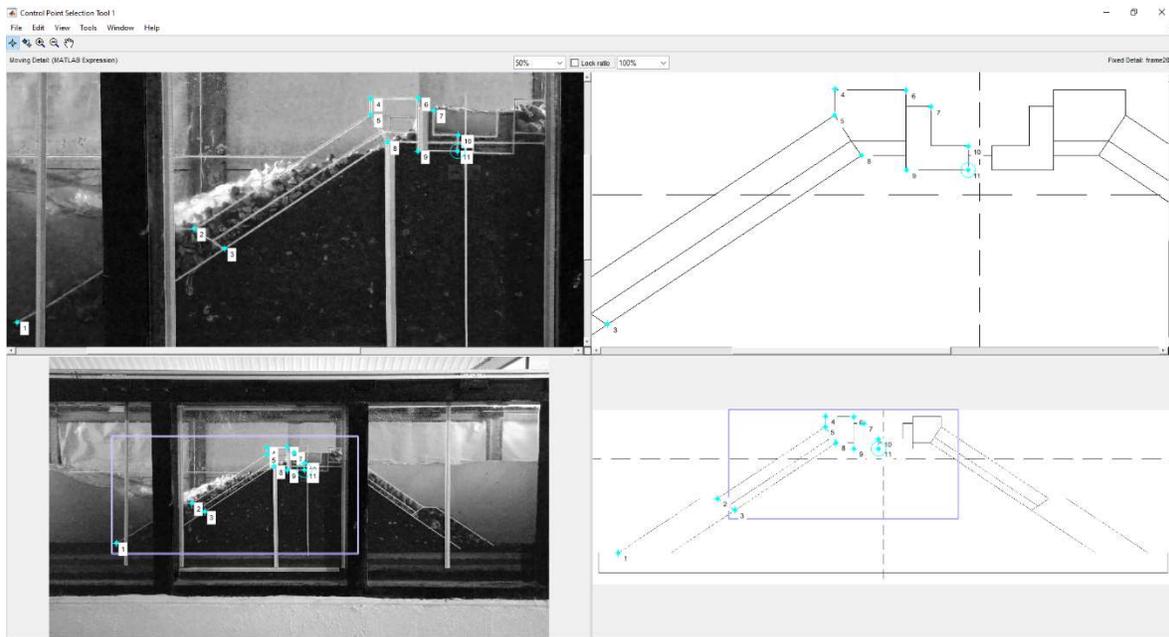


Figura 4.3 Selección de los pares de puntos de control en las imágenes objetivo y referencia

Una vez definidos los puntos de control, opcionalmente se puede realizar la correlación cruzada mediante la función `cpcorr`, sin embargo, dicha función solo puede ajustar puntos para imágenes que tienen la misma escala y la misma orientación, cuando no puede sintonizar los puntos, la función `cpcorr` devuelve los puntos de entrada sin modificarlos.

```
input_points_corr=  
cpcorr(movingPoints,fixedPoints,frame20(:,1),frame20P(:,1));
```

Posteriormente, se someten los puntos de control a la función `cp2tform`, la cual es una función de ajuste de datos que determina la transformación basada en la relación geométrica de los puntos de control, y devuelve los parámetros en una estructura de transformación geométrica, llamada `TFORM`. cabe señalar que, el método de transformación que más se adapta a nuestro caso de estudio es el `nonreflective similarity`, tal como se muestra en la figura 4.4.

```
mytform = cp2tform(movingPoints,fixedPoints,'nonreflective similarity');
```

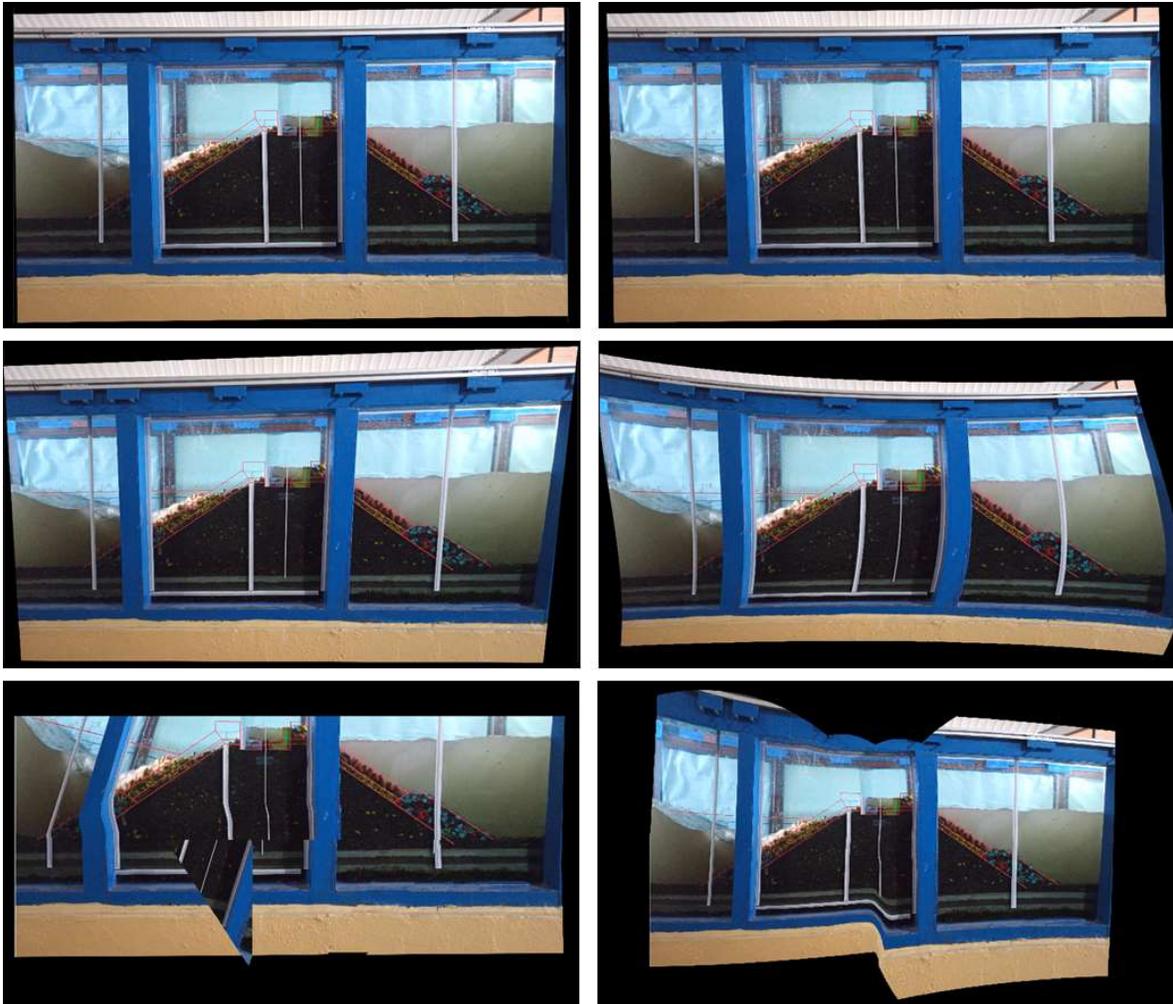


Figura 4.4 Resultados del registro de las imágenes para los diferentes tipos de transformación

Finalmente, se realiza la transformación de la imagen objetivo para alinearla con la imagen referencia, para lo cual se utiliza la función `imtransform` y la estructura `TFORM` resultante de la función `cp2tform`, así se obtiene la imagen registrada (imagen transformada), tal como se muestra en la figura 4.5, la cual debe guardarse en un archivo en formato Portable Network Graphics (*.png), para análisis posteriores que se requieran hacer sobre la imagen.



Figura 4.5 Imagen resultante del proceso de registro con el método de transformación nonreflective similarity

```
registered= imtransform(frame20,mytform);  
print('-dpng','imagen_registrada')
```

Cabe señalar que, para tener un adecuado registro de las imágenes, es necesario establecer la mayor cantidad de puntos de control posibles, como se puede observar en la figura 4.6, en la cual se muestra un comparativo de los resultados del registro de imágenes, en la cual, la imagen superior muestra la superposición de las imágenes referencia (línea azul) y objetivo, la imagen central muestra la superposición de las imágenes referencia (línea azul) y registrada con 4 puntos de control, y la imagen inferior muestra la superposición de las imágenes referencia (línea azul) y registrada con 21 puntos de control.

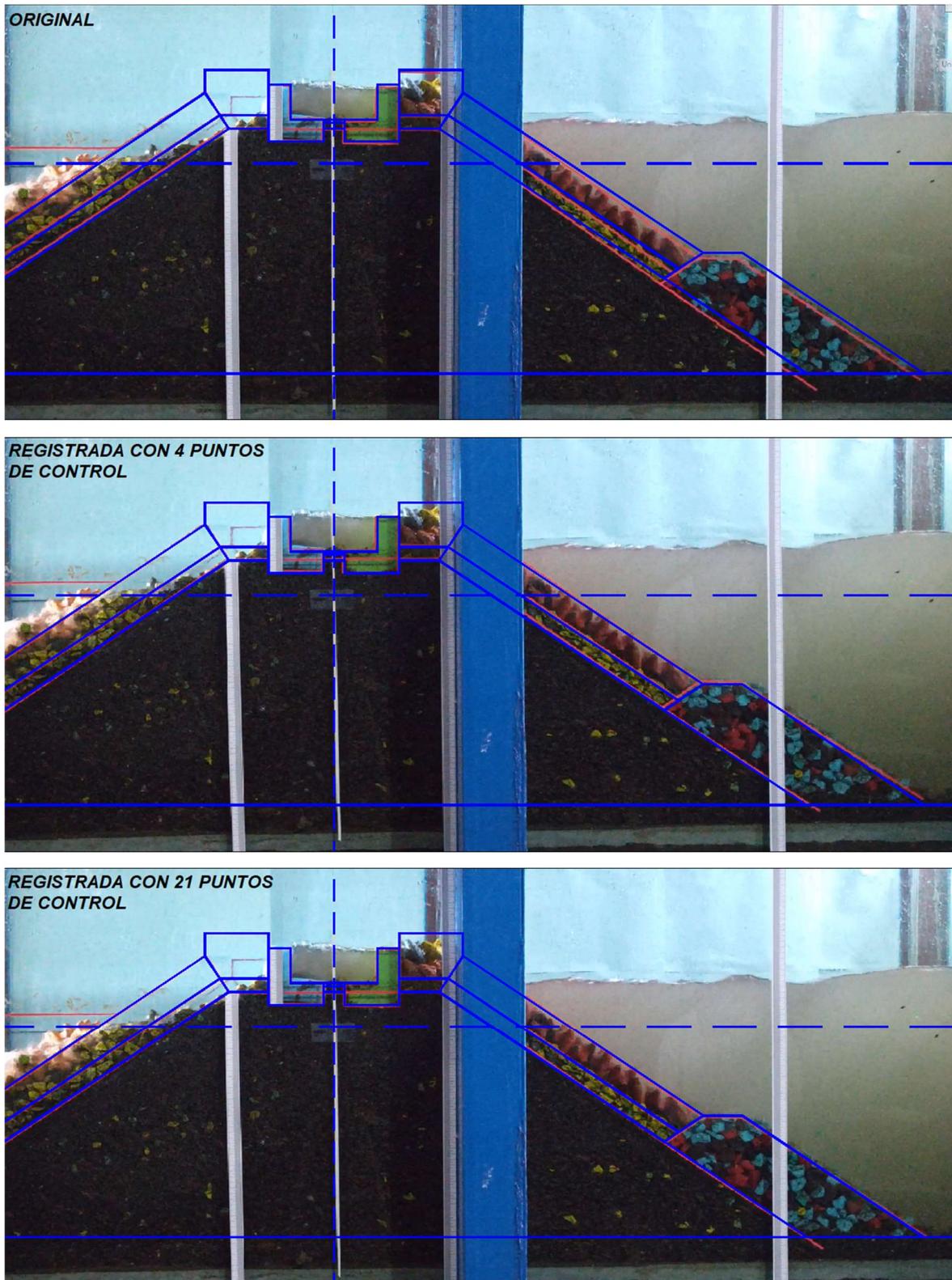


Figura 4.6 Comparación de las imágenes transformadas para diferentes cantidades de puntos de control

5. Resultados de la implementación del sistema

5.1 Procesamiento de las imágenes digitales registradas

5.1.1 Imágenes RGB

Una imagen digital se representa usualmente con una matriz de píxeles, donde cada píxel es un punto de la imagen y tiene un determinado color, dichos píxeles se representan comúnmente con las combinaciones de los tres colores primarios (aditivos) rojo, verde y azul, a esto se le llama el modelo RGB y se ha llegado a un estándar en el cual la intensidad de cada uno de los tres colores se representa con un número entre 0 y 255, donde 0 significa que el color es tan oscuro que se ve negro mientras que 255 significa que el color está en su máxima intensidad, de esta manera, un píxel negro en una imagen será un píxel en el cual los tres colores tengan intensidad 0, un píxel de color rojo puro será un píxel con intensidad 255 en el rojo e intensidad 0 en verde y azul, y un píxel blanco tendrá intensidad 255 en los tres componentes.

Este sistema permite representar más de 16 millones de colores diferentes (2^{32}) a través de la combinación de 256 niveles de rojo, con 256 niveles de verde y 256 niveles de azul. El rango 0 - 255 podría parecer arbitrario, pero tiene muchísimo sentido, usando 8 bits (1 byte) se pueden representar los números entre 0 y 255, así que el sistema RGB requiere de exactamente 3 bytes por cada píxel de una imagen.

5.1.2 Escala de grises

Como ya se mencionó, en el modelo RGB, el negro se forma con componentes rojos, verde y azul con valor 0, mientras que el blanco se forma con los 3 componentes con su máximo valor. Los colores intermedios (grises) tienen la propiedad de tener los tres componentes con la misma intensidad, así, un píxel con valores (50, 50, 50) será un gris bastante oscuro, mientras que un píxel con valores (200, 200, 200) será un gris bastante claro.

Convertir una imagen a escala de grises requiere entonces recorrer la imagen entera, pixel por pixel, y modificar los componentes rojo, verde y azul para que sean iguales, con el valor promedio de los tres componentes, de esta manera se conserva la intensidad (qué tan iluminado es el pixel) pero se pierde el tono de todos los pixeles

En la figura 5.1, se muestra a manera de ejemplo una imagen RGB sencilla y la correspondiente separación de los canales de colores como una imagen de intensidad en escala de grises y una imagen de color.

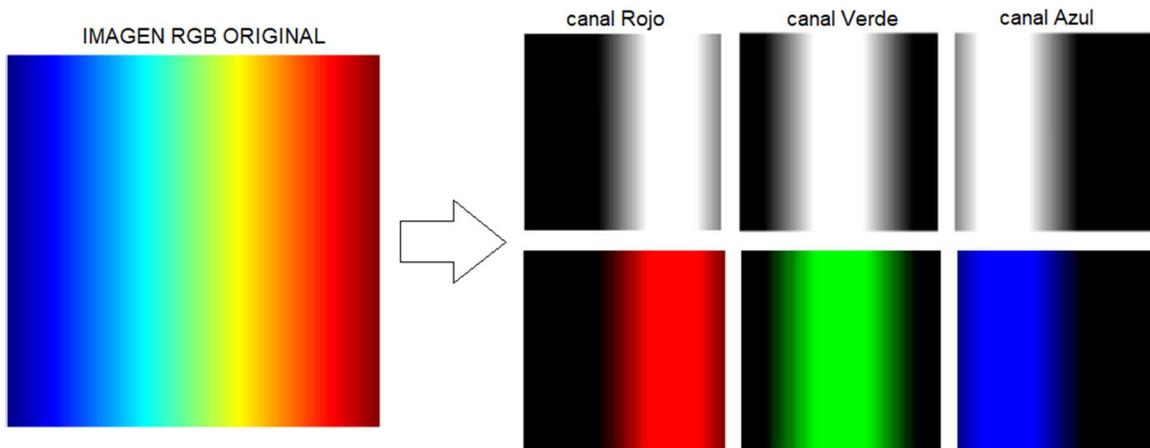


Figura 5.1 Separación de imágenes en canales RGB y escala de grises

5.1.3 Binarización

Otra técnica que se aplica sobre muchas imágenes transforma los pixeles para que sean sólo negros o blancos. Para esto se calcula el nivel de intensidad original de cada pixel y se convierte en negro o blanco según si la intensidad está por debajo o por encima de un umbral definidos, es decir, todos los pixeles cuya intensidad esté por debajo del umbral se convertirán en pixeles negros mientras que el resto de convertirán en pixeles blancos.

5.2 Procesamiento de las imágenes por medio del modelo RGB

Para detectar los daños ocasionados en la sección transversal del rompeolas en las imágenes registradas de acuerdo con lo señalado en el punto anterior, es necesario en primera instancia, determinar adecuadamente las áreas que corresponden al agua y las áreas de la estructura ensayada, para lo cual, se debe establecer los valores RGB que corresponden al agua para aislarlos de la estructura y del canal de olas, debido a que, si no se encuentran intervalos exactos de los valores RGB del

agua, éstos se pueden confundir con alguna otra área de la fotografía y también confundirse con áreas del canal de olas.

Para identificar los valores RGB de los píxeles que corresponden al agua y establecer un rango RGB adecuado, se usa la función `impixel` del módulo Image Processing Toolbox de MATLAB, con la cual se obtendrá una matriz con los valores RGB de cada pixel seleccionado, debido a la gran cantidad de matices de colores del agua del canal de olas, es recomendable hacer la selección de la mayor cantidad de píxeles posible y tratar de cubrir toda el área del agua, como se muestra en la figura 5.2



Figura 5.2 Mapeo de puntos de control para la selección de píxeles RGB

Cabe señalar que, el proceso de selección de los valores RGB, solo se debe hacer una vez por cada ensayo o cada vez que se mueva la cámara, por lo que, los valores RGB de los píxeles se deben guardar en un archivo tipo *.mat (archivo binario propio de Matlab) y puedan ser llamados cada vez que se analice una imagen obtenida de la duración del ensayo hidráulico.

```
pixels = impixel(registered);  
R1 = [min(pixels(:,1));max(pixels(:,1))];  
G1 = [min(pixels(:,2));max(pixels(:,2))];  
B1 = [min(pixels(:,3));max(pixels(:,3))];  
save('RGB_control','R1','B1','G1');
```

Para el caso que se muestra en este documento, se identificó que, durante los primeros segundos del ensayo, el agua estaba muy clara y no fue posible seleccionar adecuadamente los píxeles que permitieran delimitar

el área de agua, por lo que fue necesario tomar como referencia una imagen donde el agua ya removió los sedimentos y se volvió turbia, tal como se muestra en la figura 5.3.



Figura 5.3 Comparación de la turbidez del agua al inicio del ensayo (imagen superior) y al poco tiempo del inicio del ensayo (imagen inferior)

Con objeto de eliminar en el procesamiento de la información los elementos que no son de interés, como la estructura que conforma las

ventanas de observación del canal de olas y la base del mismo, se establecieron tres áreas de análisis, con la función `getpts`.

```
imshow(registered);
[xi,yi] = getpts;
xi=round(xi); yi = round(yi);
save('limites','xi','yi');
```



Figura 5.4 Selección de límites de las imágenes para eliminar elementos que no son de interés

La identificación del agua y de la sección transversal del rompeolas, se realiza píxel por píxel, y de acuerdo con los criterios de los valores RGB realiza un cambio de color al área de agua (verde), así también como al área del rompeolas (azul) y todo lo demás no se visualiza como resultado (negro)., tal como se muestra en las figuras 5.5 – 5.13, las cuales corresponden a los resultados obtenidos para diferentes tiempos de un ensayo en el modelo hidráulico.

```
load('limites.mat');
load('RGB_control.mat');
ensayo = registered;
[Height,Width,z] = size(registered); clear z
a=0; b=0; x=0; y=0; LEMNA1=0;
for a=1:Height
    for b=1:Width
        R=ensayo(a,b,1); G=ensayo(a,b,2); B=ensayo(a,b,3);
        if R>=R1(1) & R<=R1(2) & G>=G1(1) & G<=G1(2) &...
```

```
B>=B1(1) & B<=B1(2)
x=a; y=b;
procesada(x,y,1)=0; procesada(x,y,2)=255; procesada(x,y,3)=0;
elseif R>=1 & R<=50 & G>=10 & G<=80 & B>=5 & B<=60
x=a; y=b;
procesada(x,y,1)=0; procesada(x,y,2)=0; procesada(x,y,3)=255;
elseif R>=20 & R<=180 & G>=30 & G<=140 & B>=20 & B<=160
x=a; y=b;
procesada(x,y,1)=0; procesada(x,y,2)=0; procesada(x,y,3)=255;
else
x=a; y=b;
procesada(x,y,1)=0; procesada(x,y,2)=0; procesada(x,y,3)=0;
end
if a>max(yi) | a<min(yi) | b<xi(1) | b>xi(6)
x=a; y=b;
procesada(x,y,1)=0; procesada(x,y,2)=0; procesada(x,y,3)=0;
LEMNA1 = LEMNA+1;
elseif a<=max(yi) & a>=min(yi) & ...
((b>xi(2) & b<xi(3)) | (b>xi(4) & b<xi(5)))
x=a; y=b;
procesada(x,y,1)=0; procesada(x,y,2)=0; procesada(x,y,3)=0;
LEMNA1 = LEMNA+1;
end
end
end
figure(1); imshow(ensayo); print('-dpng','Ensayo');
figure(2); imshow(procesada); print('-dpng','Procesada');
save('resultados','procesada');
```

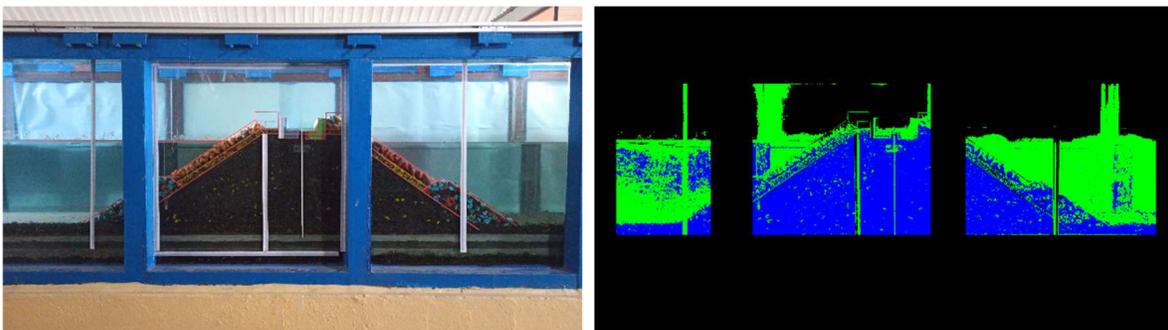


Figura 5.5 Procesamiento de la imagen digital al tiempo 0 del ensayo

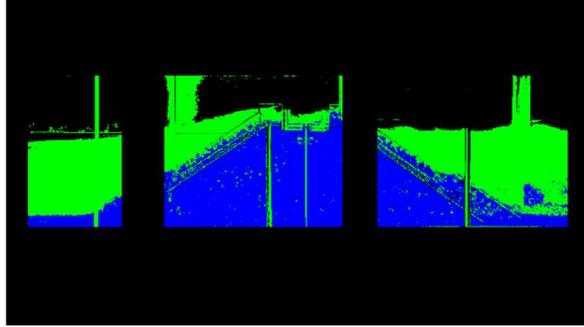


Figura 5.6 Procesamiento de la imagen digital al tiempo 00:00:49 del ensayo

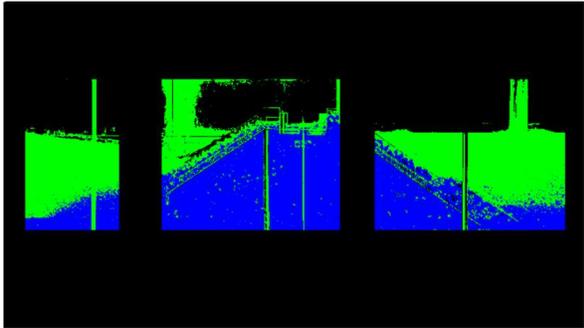


Figura 5.7 Procesamiento de la imagen digital al tiempo 00:01:38 del ensayo

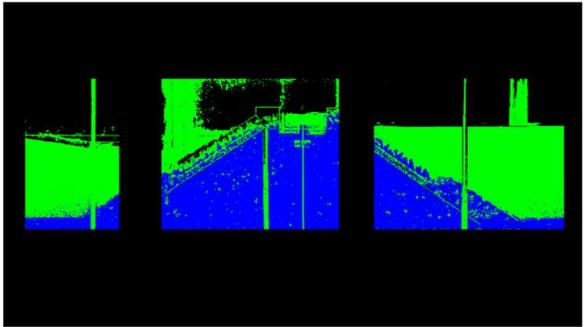


Figura 5.8 Procesamiento de la imagen digital al tiempo 00:15:17 del ensayo

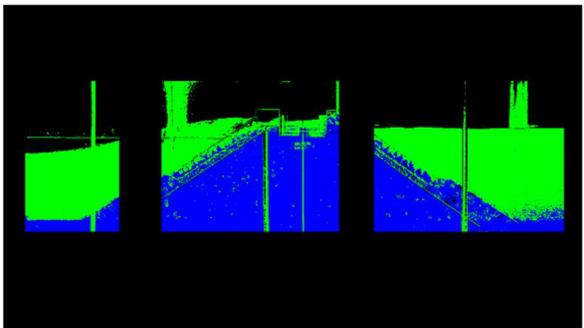


Figura 5.9 Procesamiento de la imagen digital al tiempo 00:16:23 del ensayo

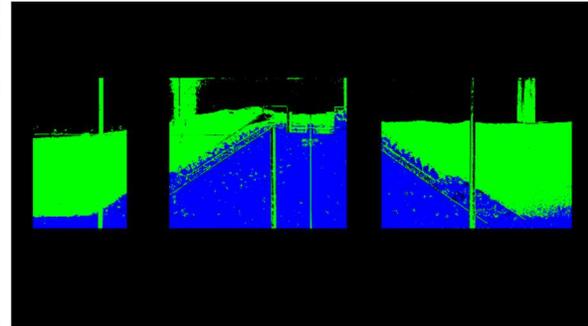


Figura 5.10 Procesamiento de la imagen digital al tiempo 00:17:28 del ensayo

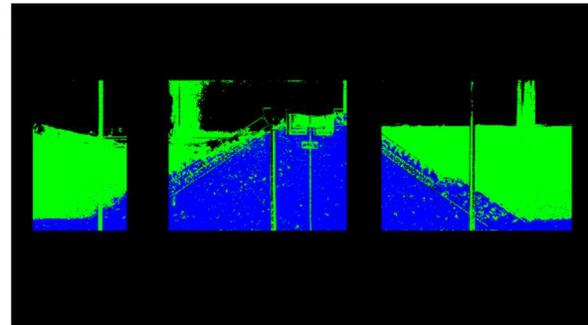


Figura 5.11 Procesamiento de la imagen digital al tiempo 00:17:55 del ensayo

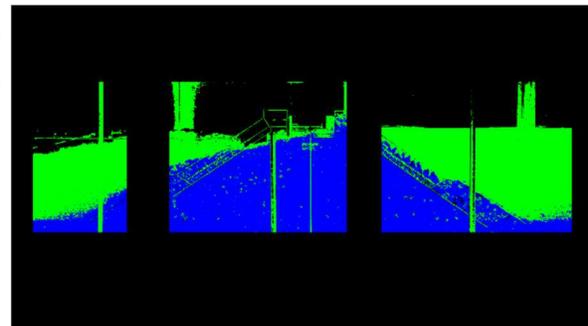


Figura 5.12 Procesamiento de la imagen digital al tiempo 00:18:25 del ensayo

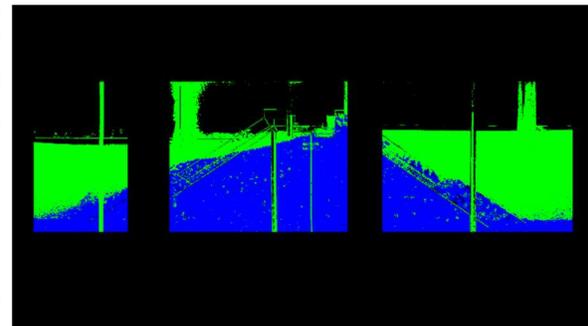


Figura 5.13 Procesamiento de la imagen digital al tiempo 00:18:54 del ensayo

En las figuras resultantes se observa que:

- El procesamiento de la imagen detecta la parte posterior de la estructura del canal, y las reglas de escala que se pusieron como referencias.
- Mientras no se produce la degradación de la estructura, no se lograron detectar los elementos de la coraza, esto debido a que, en la elección de los puntos de control del agua (píxeles RGB), el espectro de colores cubre la gama de combinaciones del color de la pintura de los elementos.
- Cuando el agua remueve los sedimentos del canal, se puede detectar más fácilmente los límites, sin embargo, como se mencionó anteriormente, el color de los elementos de la coraza del lado izquierdo (lado mar), los detecta como agua.
- El punto focal de la cámara debe colocarse por abajo del nivel mínimo que alcance la ola, debido a que en el sitio donde se colocó, en algunas fotografías sobre todo cuando la ola está arribando a la estructura, se detecta un segundo contorno de la ola sobre la pared posterior del canal
- Es necesario cambiar el fondo blanco que se utilizó para filtrar los reflejos, por otro color que pueda ser fácilmente identificable y eliminarlo en el análisis de las imágenes.

5.2.1 Cálculo de las áreas de la deformación de la estructura

Con el proceso anterior, es posible determinar los daños ocurridos en el rompeolas, a través del cálculo de las variaciones en las áreas, por lo que, de las imágenes resultantes se seleccionan los píxeles correspondientes al color azul (RGB = 0,0,255) y con dos diferentes imágenes, se puede calcular para cada sección de análisis de la imagen, las variaciones en el área de la estructura, lo que representaría los daños en la estructura.

```
load('resultados.mat'); load('limites.mat');
NEGRO = zeros(1,3); VERDE = NEGRO; AZUL = NEGRO;
for a=min(yi):max(yi)
    for b=xi(1):xi(2)
        R=procesada(a,b,1); G=procesada(a,b,2); B=procesada(a,b,3);
        if R == 0 & G == 255 & B == 0;
            VERDE(1) = VERDE(1)+1;
        elseif R == 0 & G == 0 & B == 255;
```

```
        AZUL(1) = AZUL(1)+1;
    else
        NEGRO(1) = NEGRO(1)+1;
    end
end
end
for a=min(yi):max(yi)
    for b=xi(3):xi(4)
        R=procesada(a,b,1); G=procesada(a,b,2); B=procesada(a,b,3);
        if R == 0 & G == 255 & B == 0;
            VERDE(2) = VERDE(2)+1;
        elseif R == 0 & G == 0 & B == 255;
            AZUL(2) = AZUL(2)+1;
        else
            NEGRO(2) = NEGRO(2)+1;
        end
    end
end
for a=min(yi):max(yi)
    for b=xi(5):xi(6)
        R=procesada(a,b,1); G=procesada(a,b,2); B=procesada(a,b,3);
        if R == 0 & G == 255 & B == 0;
            VERDE(3) = VERDE(3)+1;
        elseif R == 0 & G == 0 & B == 255;
            AZUL(3) = AZUL(3)+1;
        else
            NEGRO(3) = NEGRO(3)+1;
        end
    end
end
end;
```

A manera de ejemplo, al tomar las imágenes inicial y final (correspondientes al tiempo 00:00:00 y 00:18:54 respectivamente) del ensayo realizado para el desarrollo de la presente metodología, se obtuvieron los siguientes resultados

```
fac_escala = 21.182;
p_prot = 1/fac_escala;
esc_mod = 64;
p_mod = p_prot*100/esc_mod;
a_prot = p_prot^2;
a_mod = p_mod^2;
am_AZUL(kkk,:) = AZUL(kkk,:).*a_mod;
ap_AZUL(kkk,:) = AZUL(kkk,:).*a_prot;
```

Sección 1 (sección que corresponde a la ventana izquierda del canal de olas).

- Área inicial = 367.60 cm² en modelo (150.57 m² en prototipo).
- Área final = 573.94 m² en modelo (235.08 m² en prototipo).
- Diferencia = + 206.34 cm² en modelo (+ 84.51 m² en prototipo), esta diferencia representa una acumulación de material.

Sección 2 (sección que corresponde a la ventana central del canal de olas).

- Área inicial = 3430.42 cm² en modelo (1405.10 m² en prototipo).
- Área final = 3342.99 m² en modelo (1369.29 m² en prototipo).
- Diferencia = - 87.43 cm² en modelo (- 35.81 m² en prototipo), esta diferencia representa una pérdida de material.

Sección 3 (sección que corresponde a la ventana derecha del canal de olas).

- Área inicial = 1614.08 cm² en modelo (661.13 m² en prototipo).
- Área final = 1654.53 m² en modelo (677.69 m² en prototipo).
- Diferencia = + 40.45 cm² en modelo (+ 16.57 m² en prototipo), esta diferencia representa una acumulación de material.

Cabe señalar que los valores antes indicados representan el total las variaciones de las áreas por sección, por lo que, resulta necesario identificar las zonas de la estructura de protección donde se presentan dichas variaciones. Los resultados obtenidos se indican en la figura 5.14, en la cual, la imagen superior corresponde al estado inicial de la estructura, la imagen central corresponde al estado final de la estructura y la imagen inferior indica la deformación de la estructura, donde la línea en color rojo indica el aumento del área de la estructura debido a la acumulación de material y la línea azul indica la reducción del área de la estructura debido a la degradación de la misma.

```
load('resultados.mat'); % Imagen inicial
load('resultados_2.mat'); % Imagen final
[Height,Width,z] = size(procesada); clear z
AZUL = zeros(1,Width); ROJO = zeros(1,Width);
load('limites.mat'); lll = 1;
for a=1:Width
    for b=min(yi):max(yi)
        R=procesada(b,a,1); G=procesada(b,a,2); B=procesada(b,a,3);
        R2=procesada2(b,a,1); G2= procesada2(b,a,2); B2= procesada2(b,a,3);
        if R == 0 & G == 0 & B == 255;
            AZUL(1,lll) = AZUL(1,lll)+1;
        end
    end
end
```

```
    if R2 == 0 & G2 == 0 & B2 == 255;
        ROJO(1,III) = ROJO(1,III)+1;
    end
end
end
III = III+1;
end
TOTAL = AZUL-ROJO; To = TOTAL;
Xi1=0; Yi1=0; Xi2=8; Yi2=3; xo=0.1; yo=0.1; Lx=7.8; Ly=2.8; fig = figure;
set(fig,'paperposition',[Xi1 Yi1 Xi2 Yi2]);
a=axes('position',[xo/Xi2, yo/Yi2, Lx/Xi2, Ly/Yi2]);
Ax = find(TOTAL>=0); To(Ax) = NaN;
plot(-To,'r'); hold on; To = TOTAL;
Ax = find(TOTAL<=0); To(Ax) = NaN;
plot(-To,'b'); plot([0 4000],[0 0],'k');
plot([xi(2) xi(2)],[-500 500],'--k');
plot([xi(3) xi(3)],[-500 500],'--k');
plot([xi(4) xi(4)],[-500 500],'--k');
plot([xi(5) xi(5)],[-500 500],'--k'); axis([0 3840 -400 400]);
set(gca,'XTickLabel',[],'YTickLabel',[]);
text(15,350,'\bf\Uparrow acumulación','Color','red');
text(15,-350,'\bf\Downarrow degradación','Color','blue');
AREA1=TOTAL([xi(1):xi(2)]);
A = sum(AREA1(sign(AREA1)==1))*a_mod; Ap= A*(esc_mod/100)^2;
B = sum(AREA1(sign(AREA1)==-1))*a_mod; Bp= B*(esc_mod/100)^2;
text(50,-300,['A = ',num2str(A,'%2f'),' cm^2,' (' ,num2str(Ap,'%2f'),...
    ' m^2,')'],'Color','blue','FontSize',7);
text(50,300,['A = ',num2str(-B,'%2f'),' cm^2,' (' ,num2str(-Bp,'%2f'),...
    ' m^2,')'],'Color','red','FontSize',7);
AREA2=TOTAL([xi(3):xi(4)]);
C = sum(AREA2(sign(AREA2)==1))*a_mod; Cp= C*(esc_mod/100)^2;
D = sum(AREA2(sign(AREA2)==-1))*a_mod; Dp= D*(esc_mod/100)^2;
text(1250,-300,['A = ',num2str(C,'%2f'),' cm^2,' (' ,num2str(Cp,'%2f'),...
    ' m^2,')'],'Color','blue','FontSize',7);
text(1250,300,['A = ',num2str(-D,'%2f'),' cm^2,' (' ,num2str(-Dp,'%2f'),...
    ' m^2,')'],'Color','red','FontSize',7);
AREA3=TOTAL([xi(5):xi(6)]);
E = sum(AREA3(sign(AREA3)==1))*a_mod; Ep= E*(esc_mod/100)^2;
F = sum(AREA3(sign(AREA3)==-1))*a_mod; Fp= F*(esc_mod/100)^2;
text(2750,-300,['A = ',num2str(E,'%2f'),' cm^2,' (' ,num2str(Ep,'%2f'),...
    ' m^2,')'],'Color','blue','FontSize',7);
text(2750,300,['A = ',num2str(-F,'%2f'),' cm^2,' (' ,num2str(-Fp,'%2f'),...
    ' m^2,')'],'Color','red','FontSize',7);
print('-dpng','Degradacion'); close all
```

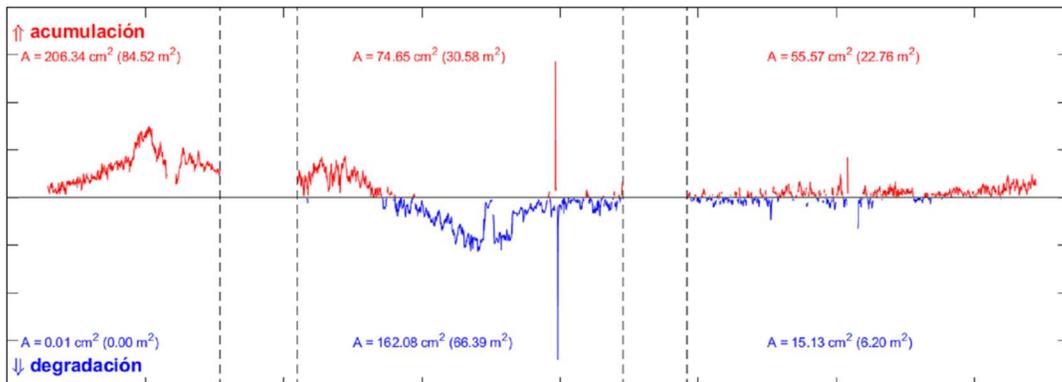


Figura 5.14 Resultados obtenidos del cálculo de las áreas de deformación de la estructura

Cabe señalar que, el algoritmo y metodología desarrollada para el procesamiento y análisis de las imágenes digitales funciona adecuadamente, sin embargo, resulta necesario realizar algunas modificaciones referentes a las condiciones que deben tener el ensayo en el modelo hidráulico, a fin de tener un buen control en el manejo de los canales RGB de las imágenes digitales resultantes

De igual forma se recomienda que durante la planeación del ensayo en el modelo hidráulico, se considere de ser posible, la mayor cantidad de los vértices de la estructura sean visibles, esto a fin de tener el máximo posible de puntos de control para el registro y transformación de las imágenes digitales resultantes.

El algoritmo indicado, fue desarrollado para realizar el registro de una imagen a la vez, sin embargo, es posible mediante instrucciones de bucles (for... end) establecer una serie temporal de imágenes, que permitan realizar algún otro tipo de análisis como pudiera ser:

- Run-up y run-down del oleaje, que es el ascenso – descenso de la ola, cuando alcanza el talud interno de una estructura y cuya magnitud depende de la pendiente del mismo talud, del material que la constituye, del peralte del oleaje, del ángulo de incidencia del oleaje, entre otras cosas.
- Overtopping, que es el rebasamiento del oleaje por encima de las estructuras de protección portuaria y costera.

Conclusiones

Tomando como base los resultados anteriormente mencionados, se puede concluir lo siguiente:

En el caso de la adecuación del modelo físico, se requiere que el fondo que se encuentra en el modelo, deberá ser con colores más fuertes, para que cuando se realice el análisis pueda ayudar a mejorar el cálculo de las áreas.

Cuando se realice la transformación de las imágenes, se requiere establecer una mayor cantidad de parejas de puntos de control para que con ello se pueda tener un adecuado registro de imágenes.

En lo que se refiere al algoritmo que se realizó para el análisis y procesamiento de imágenes, se observó que funciona adecuadamente. Sin embargo, es necesario realizar modificaciones a las condiciones del ensayo del modelo hidráulico, y con ello, se podrá tener un buen control en el manejo de los canales RGB de las imágenes digitales resultantes.

Finalmente, se recomienda que, durante la planeación del ensayo en el modelo hidráulico, se considere de ser posible, la mayor cantidad de los vértices de la estructura sean visibles, esto a fin de tener el máximo posible de puntos de control para el registro y transformación de las imágenes digitales resultantes. Además, el punto focal de la cámara se coloque a nivel de piso del modelo para que análisis no encuentre dos zonas de nivel de agua.

Con el algoritmo y la metodología desarrollada es posible realizar en una segunda fase del proyecto, algún otro tipo de análisis como pudiera ser:

- Determinación del Run-up y run-down del oleaje, y
- Cálculo del Overtopping (rebase del oleaje por encima de la corona de las estructuras de protección portuaria y costera).

Bibliografía

- Ardeshir, A. (2005). *2-D and 3-D Image Registration for Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications*. Estados Unidos: Wiley-Interscience.
- Domokos, C., Kato, Z., & Francos, J. (2008). *Parametric estimation of affine deformations of binary images*. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2008, 889-892. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2008.4517753>
- Manríquez, E. (2018). *Identificación de zonas de manglar a través de procesamiento de imágenes de satélite*. [Tesis para optar el grado Académico] de Maestro en Sistemas Computacionales]. México: Tecnológico Nacional de México.
- Mathworks. (2022). *Image Processing Toolbox User's Guide*. [Consulta en línea]. <https://la.mathworks.com/help/matlab/>
- Simonson, K., Drescher, S. & Tanner, F. (2007). *A Statistics Based Approach to Binary Image Registration with Uncertainty Analysis*. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence 29(1), 112-125 <https://doi.org/10.1109/tpami.2007.250603>
- Torres, E. (2016). *Identificación del área afectada por lemna en la Bahía de Puno, utilizando procesamiento digital de imágenes*. [Tesis para optar el grado Académico de Magister Scientiae en Informática]. Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- Wong, P. (2007). *Sistema de monitoreo utilizando cámaras robotizadas*. [Tesis para optar el grado Académico de Maestro en Ingeniería]. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zitová, B. & Flusser, J. (2003). *Image registration methods: a survey*. Image and Vision Computing 21, 977-1000. [http://doi.org/10.1016/S0262-8856\(03\)00137-9](http://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00137-9)



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>