



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

# **SIMULACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS Y TENSIÓN DE LAS AMARRAS DE BARCOS ATRACADOS EN LAS BANDAS A, B Y C DEL PUERTO DE MANZANILLO**

---

Manuel Mendoza Grande  
Adriana Guadalupe Porres López

Publicación Técnica No. 637  
**Sanfandila, Qro.**  
2021

ISSN 0188-7297



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, por el M. en I. Manuel Mendoza Grande y en coautoría de la M. en C. Adriana Guadalupe Porres López.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación de iniciativa interna VI 01 20, "Investigación en un simulador de maniobras de embarcaciones en tiempo real de los movimientos de barcos atracados en las bandas A, B y C del puerto de Manzanillo".



# Contenido

---

	Página
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	xi
Sinopsis.....	xiii
Abstract.....	xv
Resumen Ejecutivo .....	xvii
Introducción.....	1
1 Información oceanográfica y meteorológica.....	3
2 Análisis y características de los barcos.....	13
3 Modelos matemático e hidrodinámico del simulador.....	43
4 Simulaciones y resultados de las maniobras .....	53
Conclusiones.....	85
Bibliografía .....	87

---



# Índice de figuras

---

	Página
Figura 1.1 Localización de la boya en Manzanillo, Col.....	4
Figura 1.2 Distribución de alturas y períodos de oleaje, régimen anual. ....	5
Figura 1.3 Distribución de los registros de oleaje Altura de ola - período .....	6
Figura 1.4 Gráfica del viento reinante (mayor frecuencia) y del viento dominante (mayor intensidad) por dirección, régimen anual .....	8
Figura 1.5 Gráfica de la elevación del mar para los meses de enero y febrero del 2020 .....	10
Figura 1.6 Gráfica de la elevación del nivel del mar para los meses de marzo y abril del 2020.....	10
Figura 1.7 Gráfica de la elevación del nivel del mar para los meses de mayo y junio del 2020 .....	11
Figura 1.8 Gráfica de la elevación del nivel del mar para los meses de julio y agosto del 2020.....	11
Figura 1.9 Gráfica de la elevación del nivel del mar para los meses de septiembre a octubre del 2020.....	12
Figura 1.10 Gráfica de la elevación del nivel del mar para los meses de noviembre a diciembre del 2020 .....	12
Figura 2.1 Esquema de las dimensiones principales de un barco .....	14
Figura 2.2 Arreglo de amarre típico a lo largo del muelle .....	15
Figura 2.3 Número de arribo vs tipo de barcos .....	16
Figura 2.4 Relación entre la manga y el caldo con respecto a la eslora para el tramo 2 y un barco granelero .....	16
Figura 2.5 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 2 y un barco portacontenedor .....	17

Figura 2.6 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 2 y un barco Ro-Ro .....	17
Figura 2.7 Número de arribo vs tipo de barcos .....	18
Figura 2.8 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 3 y un barco granelero .....	18
Figura 2.9 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 3 y un barco portacontenedor .....	19
Figura 2.10 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 3 y un barco Ro-Ro .....	19
Figura 2.11 Número de arribo vs tipo de barcos .....	20
Figura 2.12 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 4 y un barco granelero .....	20
Figura 2.13 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 4 y un barco portacontenedor .....	21
Figura 2.14 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 4 y un barco Ro-Ro .....	21
Figura 2.15 Número de arribo vs tipo de barcos .....	22
Figura 2.16 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 5 y un barco granelero .....	22
Figura 2.17 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 5 y un barco portacontenedor .....	23
Figura 2.18 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 5 y un barco Ro-Ro .....	23
Figura 2.19 Número de arribo vs tipo de barcos .....	24
Figura 2.20 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 6 y un barco granelero .....	24
Figura 2.21 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 6 y un barco portacontenedor .....	25
Figura 2.22 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 6 y un barco Ro-Ro .....	25

Figura 2.23 Número de arribo vs tipo de barcos .....	26
Figura 2.24 Relación entre la manga y el caldo con respecto a la eslora para el tramo 7 y un barco granelero .....	26
Figura 2.25 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 7 y un barco portacontenedor .....	27
Figura 2.26 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 7 y un barco Ro-Ro .....	27
Figura 2.27 Número de arribo vs tipo de barcos .....	28
Figura 2.28 Relación entre la manga y el caldo con respecto a la eslora para el tramo 8 y un barco granelero .....	28
Figura 2.29 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 8 y un barco portacontenedor .....	29
Figura 2.30 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 8 y un barco Ro-Ro .....	29
Figura 2.31 Número de arribo vs tipo de barcos .....	30
Figura 2.32 Relación entre la manga y el caldo con respecto a la eslora para el tramo 9 y un barco granelero .....	30
Figura 2.33 Número de arribo vs tipo de barcos .....	31
Figura 2.34 Relación entre la manga y el caldo con respecto a la eslora para el tramo 10 y un barco granelero .....	31
Figura 2.35 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 10 y un barco portacontenedor .....	32
Figura 2.36 Número de arribo vs tipo de barcos .....	32
Figura 2.37 Relación entre la manga y el caldo con respecto a la eslora para el tramo 11 y un barco granelero .....	33
Figura 2.38 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 11 y un barco portacontenedor .....	33
Figura 2.39 Número de arribo vs tipo de barcos .....	34
Figura 2.40 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 12 y un barco portacontenedor .....	34

Figura 2.41 Número de arribo vs tipo de barcos .....	35
Figura 2.42 Relación entre la manga y el caldo con respecto a la eslora para el tramo 13 y un barco granelero .....	35
Figura 2.43 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 13 y un barco portacontenedor .....	36
Figura 2.44 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 13 y un barco Ro-Ro .....	36
Figura 2.45 Número de arribo vs tipo de barcos .....	37
Figura 2.46 Relación entre la manga y el caldo con respecto a la eslora para el tramo 14 y un barco granelero .....	37
Figura 2.47 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 14 y un barco portacontenedor .....	38
Figura 2.48 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 14 y un barco Ro-Ro .....	38
Figura 2.49 Modelo de barco tomada de la base de datos del simulador (BULK006L).....	40
Figura 2.50 Modelo de barco tomada de la base de datos del simulador (CNTNR28L) .....	40
Figura 2.51 Modelo de barco tomada de la base de datos del simulador (CNTNR31L) .....	41
Figura 2.52 Modelo de barco tomada de la base de datos del simulador (CARCO06L).....	41
Figura 3.1 Diagrama de flujo de un simulador de embarcaciones en tiempo real .....	45
Figura 3.2 Sistema de referencia donde se muestra el eje terrestre (EA), el eje general del cuerpo (GBA), el vector de velocidad del buque $v$ , la velocidad de giro $r$ y el ángulo de deriva $b$ .....	47
Figura 4.1 Ubicación del análisis de maniobras en las diferentes bandas .....	54
Figura 4.2 Barcos que se utilizaron en las simulaciones.....	55
Figura 4.3 Condiciones iniciales para modelar el efecto de Tsunami de 1995..	60

Figura 4.4 Corriente entrante generada por el Tsunami al puerto de Manzanillo .....	61
Figura 4.5 Corriente saliente generada por el Tsunami al puerto de Manzanillo .....	61
Figura 4.6 Condiciones de frontera de la elevación del mar para el puerto de Manzanillo .....	63
Figura 4.7 Corriente entrante producida por la marea al puerto de Manzanillo .....	64
Figura 4.8 Corriente saliente producida por la marea al puerto de Manzanillo .....	64
Figura 4.9 Distribución de la sobreelevación a través del tiempo del huracán Winifred .....	68
Figura 4.10 Elevación del mar afectado por la sobreelevación del huracán Winifred .....	68
Figura 4.11 Corriente entrante producida por la marea y la sobreelevación al puerto de Manzanillo .....	69
Figura 4.12 Corriente saliente producida por la marea y la sobreelevación al puerto de Manzanillo .....	69
Figura 4.13 Distribución de las líneas de las amarras para el Bulk Carrier (BULKO06L).....	71
Figura 4.14 Distribución de las líneas de amarre para el Container (CNTNR28L) .....	71
Figura 4.15 Distribución de las líneas de las amarras para el Car Carrier (CARCO06L).....	71
Figura 4.16 Distribución de las líneas de las amarras para el Container (CNTNR31L) .....	72



# Índice de tablas

---

	Página
Tabla 1.1 Valores de altura de ola significativa media y período medio resultado de la caracterización del oleaje normal .....	5
Tabla 1.2 Resumen estadístico de oleaje por dirección .....	6
Tabla 1.3 Magnitud promedio y máxima del viento por dirección, régimen anual .....	7
Tabla 1.4 Frecuencias cruzadas de la magnitud del viento – dirección, régimen anual .....	8
Tabla 1.5 Niveles de marea en el puerto de Manzanillo (información tomada de las tablas de medición de mareas, 1993).....	9
Tabla 2.1 Modelos seleccionados para la simulación de los movimientos de los barcos en las bandas A, B y C .....	39
Tabla 3.1 Grados de libertad en función del sistema de referencia .....	50
Tabla 4.1 Condiciones de frontera tomando en cuenta el viento reinante.....	56
Tabla 4.2 Condiciones de frontera tomando en cuenta el viento dominante.....	56
Tabla 4.3 Distribución de la simulación de los barcos para los efectos de un Tsunami .....	62
Tabla 4.4 Distribución de la simulación de los barcos para los efectos de la marea .....	65
Tabla 4.5 Huracanes que afectaron la zona del puerto de Manzanillo.....	66
Tabla 4.6 Distribución de la simulación de los barcos para los efectos de marea y con sobre elevación .....	70
Tabla 4.7 Tensiones máximas con las condiciones de viento reinante .....	73
Tabla 4.8 Tensiones máximas con las condiciones de viento dominante .....	74
Tabla 4.9 Tensiones máximas con la condición de efectos del tsunami de 1995 .....	75

Tabla 4.10 Tensiones máximas con la condición de solo marea .....	76
Tabla 4.11 Tensiones máximas con la condición de marea y sobreelevación ..	77
Tabla 4.12 Movimientos verticales con la condición de viento reinante .....	78
Tabla 4.13 Movimientos verticales con la condición de viento dominante .....	79
Tabla 4.14 Movimientos verticales con la condición del efecto de un tsunami..	80
Tabla 4.15 Movimientos verticales con la condición del efecto de la marea .....	81
Tabla 4.16 Movimientos verticales con la condición del efecto de la marea y sobreelevación .....	82

# Sinopsis

---

De acuerdo a la base de datos estadísticos referida de la Administración Portuaria Integral de Manzanillo, S. A. de C. V., del 2011 al 2019 al puerto de Manzanillo, arriban barcos portacontenedores, graneleros y de vehículos que atracan en las diferentes bandas (A, B y C).

Cuando éstos barcos están atracados, empiezan a generar movimientos que pueden ser horizontales y/o verticales, estos movimientos pueden provocar afectación en la operación y el manejo de la carga. Los movimientos de barcos atracados pueden ser generados por el viento, corrientes de marea, tsunamis, entre otros.

Para definir el comportamiento de los barcos y de las amarras, se realiza un análisis de valor de la tensión de las amarras y de los movimientos de dichos barcos en un simulador de maniobras de embarcaciones en tiempo real, donde se utilizan barcos de una base visual del puerto, con características semejantes a los del puerto analizado.

La presente publicación contribuye a estandarizar el procedimiento para realizar dicho análisis en diferentes puertos de la República Mexicana y determinar la operatividad del lugar. A partir de los resultados obtenidos se recomienda un sistema de amarras cuyo límite operativo cuente con un mínimo de doce líneas de amarre.



# Abstract

---

According to the statistical database referred to by the Administración Portuaria Integral de Manzanillo, SA de CV, from 2011 to 2019 at the port of Manzanillo, container ships, bulk carriers and vehicles that dock in the different bands (A, B and C).

When these ships are docked, they begin to generate movements that can be horizontal and / or vertical, these movements can affect the operation and handling of the cargo. The movements of docked ships can be generated by the wind, tidal currents, tsunamis, among others.

In order to define the behavior of the ships and the moorings, a value analysis of the tension of the moorings and the movements of these ships is carried out in a simulator of boat maneuvers in real time, where ships from a visual base are used of the port, with characteristics similar to those of the port analyzed.

This publication contributes to standardizing the procedure to carry out said analysis in different ports of the Mexican Republic and to determine the operation of the place. Based on the results obtained, a mooring system is recommended whose operating limit has a minimum of twelve mooring lines.



## Resumen ejecutivo

---

En los últimos años, el puerto de Manzanillo ha recibido una gran cantidad de barcos, ya sea de portacontenedores, graneleros, Ro-Ro, etc. Los cuales atracan en las bandas A, B, C, dichos barcos realizan maniobras de descarga de mercancías, se ha observado que han tenido movimientos en forma horizontal (avance, deriva y guiñada) y vertical (arfada, cabeceo y balanceo). Dichos movimientos han afectado a la eficacia de las operaciones en el manejo de carga.

Para conocer el comportamiento de los movimientos de los barcos que atracan en el puerto de Manzanillo, lo primero que hay que conocer los tipos de barcos que atracan en los 14 tramos, y además es necesario definir las condiciones oceanográficas y meteorológicas.

Se analizó la información del oleaje que se presenta en el puerto, y además se realizó el análisis del viento representativo en la zona de estudio tanto para viento reinante y dominante, también se llevó a cabo el análisis de las fluctuaciones de la marea que se presenta dentro del puerto de Manzanillo.

Posteriormente se analizó los barcos que arriban al puerto de Manzanillo, con información del período de 2011 al 20119, en las diferentes bandas (A, B y C) y tramos (2 al 14), en donde se muestra que la mayor cantidad de barcos son del tipo portacontenedor, granelero y de vehículos, y con dicha información se obtuvo los modelos de barco que se requieren para el simulador de maniobras de embarcaciones en tiempo real.

Se continuo con la descripción del simulador de maniobras de embarcaciones, el cual está definido en dos áreas, la primera de ellas está destinada al puente principal, y la segunda está destinada a estaciones de trabajo para el desarrollo de las bases de datos y modelos hidrodinámicos de barcos.

Tomando en cuenta lo anterior, se realizaron varias simulaciones utilizando un simulador de maniobras de embarcaciones en tiempo real, tomando en consideración varias condiciones: marea, marea con efecto de sobrelevación por marea de tormenta, por efectos de viento reinante y viento dominante y por efectos de un tsunami que se presentó cerca de la zona de estudio.

Con las simulaciones de las maniobras de los barcos, se observa cómo se generan los movimientos verticales y la tensión máxima en sus líneas de amarre.

Con este tipo de análisis nos permitirá conocer los sistemas de amarre dinámico con un simulador de maniobras en tiempo real, y nos permite observar y analizar la dinámica del barco y el comportamiento de las líneas de amarre y de los movimientos verticales de las embarcaciones.

# Introducción

---

El puerto de Manzanillo, se encuentra en el estado de Colima, se ha posicionado como la principal entrada en el manejo de mercancías en el comercio internacional, y uno del principal manejo es el de movimientos de contenedores.

En dicho puerto arriban varios tipos de barcos que atracan en las tres bandas (A, B y C) y en sus 14 tramos que comprende el puerto. Con la información obtenida de API Manzanillo, de los años 2011 al 2019, se observó que llegaron barcos de varios tipos, como fueron: graneleros, portacontenedores y de transporte de vehículos y pocos frigoríficos.

Cuando atracan los barcos en los muelles se ha observado cómo se han generado movimientos y además como se han creado tensiones en las amarras en dichos barcos.

Actualmente, existen diferentes formas de poder simular el movimiento de embarcaciones, ya sea con modelos de maniobras en tiempo acelerado o con modelos de maniobras de embarcaciones en tiempo real.

Debido a lo anterior, se requirió analizar por medio de un simulador de embarcaciones en tiempo real, tomando en cuenta las condiciones oceanográficas y meteorológicas, que se presentan en la zona de estudio, los movimientos verticales y las tensiones que se generan es necesario conocer los barcos se han estado

Por otra parte, es importante señalar que este proyecto está alineado considerando el 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 accesible que amplíe la cobertura de transporte 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. Información oceanográfica y meteorológica

---

Para el desarrollo del análisis se requiere de buscar información oceanográfica y meteorológica, la cual se utilizó para la simulación en el simulador de maniobras de embarcaciones, principalmente se necesita la dirección y velocidad del viento reinante y dominante, la dirección, el periodo y la altura del oleaje, el cambio de marea y el cambio de la marea por efecto de un huracán, el efecto de un tsunami, etc.

## 1.1 Información de oleaje

Las zonas portuarias están protegidas de la acción de olas potencialmente dañinas, todos los sitios deben ser evaluados para la exposición al oleaje. El océano está en constante movimiento con su energía de superficie distribuida en una amplia gama de frecuencias. El "clima ondulatorio" general en un sitio determinado debe evaluarse tanto para condiciones y eventos a corto como a largo plazo con respecto a las condiciones de amarre de diseño y / o para determinar las condiciones bajo las cuales las embarcaciones deben desocupar el muelle. El clima de las olas en general consta de uno o todos los siguientes componentes:

- Olas generadas por la interacción entre el viento y la superficie del mar, limitadas por la longitud y las profundidades del mar.
- Olas generadas por un barco, limitada por el tráfico y restricciones de velocidad del buque
- Olas generadas por los fenómenos de resonancia portuaria, limitados por la geometría del puerto, la batimetría y las condiciones meteorológicas y oceanográficas.
- Olas generadas por el mar de fondo, limitadas por el clima de olas en alta mar y la batimetría portuaria y costera.

Para caracterizar el oleaje, se utilizará la información proporcionada por las boyas direccionales medidoras de oleaje de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM), del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). En el puerto de Manzanillo la boya se encuentra ubicada en las coordenadas 19.0665° Latitud norte y 104.34428° Longitud Oeste, y los datos registrados son de marzo de 2008 hasta julio 2015 (ver figura 1.1).



Figura 1.1 Localización de la boya en Manzanillo, Col.

Con la información obtenida de la base de datos de la RENEOM, se realizó un análisis estadístico de los datos de oleaje de todos los registros, dichos análisis se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$\bar{T} = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k$$

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k * H_k^2}{\bar{T}}}$$

Donde:

$T_k$  = Representa una serie de datos de periodos de oleaje en el tiempo

$H_k$  = Representa una serie de datos de alturas de oleaje en el tiempo

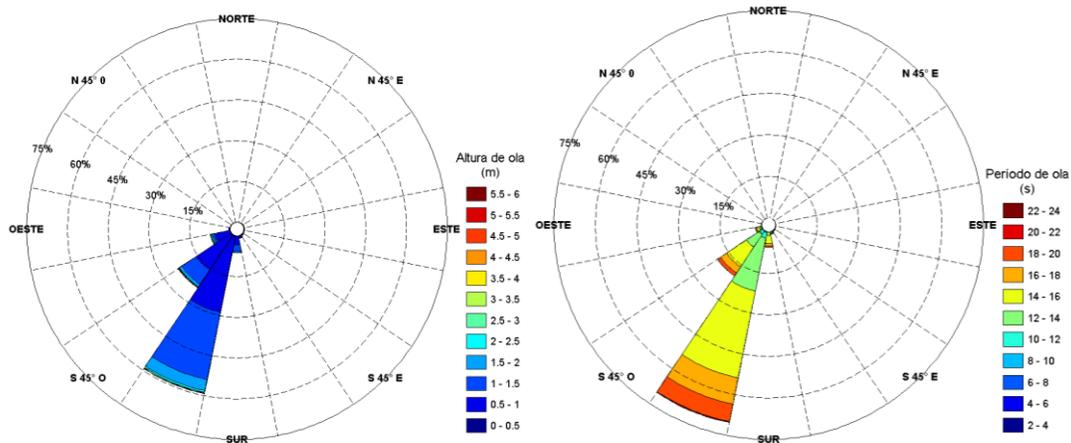
$(T_k, H_k)$  = Representa un grupo de datos de períodos y alturas de oleaje en el tiempo

$n_k$  = Es el número total de datos  $k = (1, 2, \dots, n_k)$

Los resultados que se obtuvieron se presentan en la tabla 1.2, los cuales se presentan las características medias del oleaje en régimen anual y estacional por dirección. Las direcciones que se observaron y que arriban a zona de estudio son: Sur, S22.5°O, S45°O, S67.5°O y Oeste con un 98.50% del total de los registros obtenidos., Con los datos analizados se definieron los valores de altura de ola y período medio, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1** Valores de altura de ola significativa media y periodo medio resultado de la caracterización del oleaje normal.

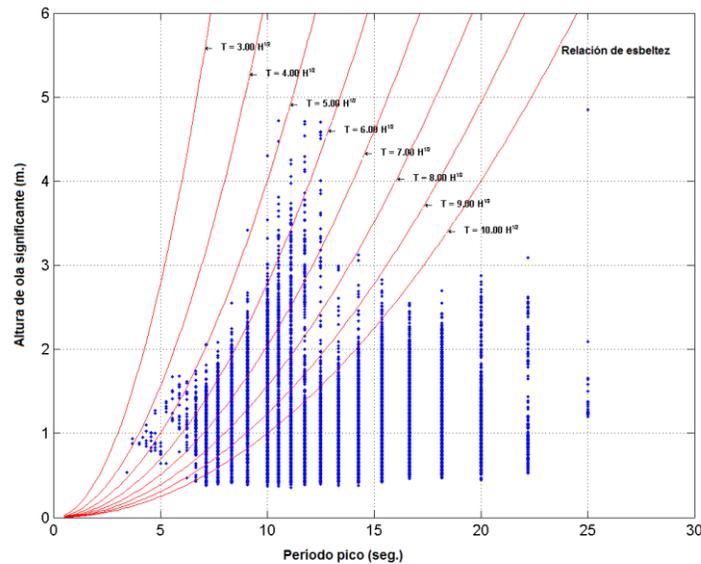
Dirección	Altura de ola media (m)	Período (s)
Sur	0.90	14.81
S 22.5° O	1.03	14.14
S 45° O	1.04	13.98
S 67.5° O	0.93	13.31
Oeste	0.89	14.01



**Figura 1.2** Distribución de alturas y período de oleaje - régimen anual.

**Tabla 1.2 Resumen estadístico de oleaje por dirección.**

Dirección	ANUAL			PRIMAVERA			VERANO			OTOÑO			INVIERNO		
	H (m)	T (s)	% acc.	H (m)	T (s)	% acc.	H (m)	T (s)	% acc.	H (m)	T (s)	% acc.	H (m)	T (s)	% acc.
NORTE	0,84	16,65	0,05	0,98	14,28	0,00	0,86	15,95	0,00	0,84	14,59	0,01	0,82	17,88	0,03
N 22.5° E	0,80	16,11	0,05	1,01	14,28	0,00	0,93	15,43	0,01	0,75	14,55	0,01	0,76	17,24	0,02
N 45° E	0,94	16,32	0,07	2,08	25,00	0,00	0,98	16,73	0,02	0,72	14,90	0,02	0,67	16,15	0,02
N 67.5° E	0,99	15,74	0,12	0,99	15,01	0,00	1,05	16,21	0,08	0,83	14,99	0,02	0,67	14,12	0,01
ESTE	0,91	15,52	0,13	0,92	14,38	0,01	1,08	16,36	0,05	0,75	15,18	0,03	0,66	14,71	0,03
S 67.5° E	0,92	16,02	0,15	0,96	13,95	0,01	1,06	16,66	0,07	0,76	15,65	0,02	0,70	15,75	0,04
S 45° E	0,89	15,83	0,20	1,05	14,36	0,01	1,07	15,89	0,06	0,78	15,82	0,08	0,70	16,22	0,03
S 22.5° E	0,87	15,28	0,37	0,94	14,10	0,04	1,03	15,28	0,09	0,84	15,67	0,14	0,67	15,21	0,09
SUR	0,90	14,81	1,65	0,96	14,30	0,26	1,06	14,62	0,37	0,89	14,91	0,68	0,68	15,24	0,33
S 22.5° O	1,03	14,14	45,20	1,05	14,68	10,62	1,16	13,71	11,44	1,03	14,11	15,54	0,75	14,09	7,58
S 45° O	1,04	13,98	41,94	1,07	14,72	8,37	1,23	13,59	10,11	1,08	14,00	11,56	0,75	13,78	11,88
S 67.5° O	0,93	13,31	8,05	0,90	14,15	0,82	1,52	9,61	0,95	1,10	11,36	1,13	0,80	14,30	5,14
OESTE	0,89	14,01	1,66	1,03	9,81	0,18	1,33	10,89	0,02	1,16	11,79	0,14	0,84	14,93	1,29
N 67.5° O	0,82	17,35	0,20				1,00	15,01	0,00	0,69	14,94	0,01	0,82	17,67	0,17
N 45° O	0,82	16,27	0,06							0,81	14,90	0,02	0,83	16,91	0,04
N 22.5° O	0,84	17,40	0,03	0,87	15,38	0,00	1,02	16,67	0,00	0,77	15,01	0,00	0,83	18,64	0,02



**Figura 1.3 Distribución de los registros de oleaje - Altura de ola – periodo.**

## 1.2 Información de viento

El viento tiene una naturaleza estocástica que depende en gran medida del tiempo y ubicación. Por lo general, se caracteriza por grandes fluctuaciones en velocidad y dirección. El viento juega dos papeles en el comportamiento de una embarcación.

- El primero es directo, donde el viento ejerce una fuerza sobre la parte expuesta de la embarcación al aire (obra muerta). Las fuerzas del viento se ejercen debido al flujo de aire alrededor de las diversas partes.

- El segundo es indirecto, el viento genera oleaje y corrientes, a través de estos, influyen indirectamente en la embarcación.

Para la caracterización del viento en el puerto de manzanillo se analizaron los registros de las Estaciones Meteorológicas Automatizadas (EMA) que pertenece a la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM).

La EMA se encuentra localizada sobre el edificio de la capitanía de puerto al canal de acceso al recinto, el periodo de registros de medición fue de noviembre 2007 a marzo 2015.

Con base en los registros obtenidos de la EMA en el puerto de Manzanillo existe una tendencia de incidencia de los vientos de los cuadrantes al Norte (del sector Norte al sector N 40° E) con un 30.95% de frecuencia y de los cuadrantes al Oeste (del sector S67.5°E al sector Oeste) con un 32.92% de frecuencia.

**Tabla 1.3 Magnitud promedio y máxima del viento por dirección – régimen anual.**

Dirección	N	Vmed (m/s)	Vmax (m/s)
Norte	2025	2.37	11.35
N 22.5°E	3640	1.65	7.27
N 45° E	2417	1.64	5.60
N 67.5° E	945	1.36	5.29
Este	722	1.76	5.22
S 67.5° E	851	2.29	7.99
S 45° E	579	2.97	8.28
S 22.5° E	933	3.63	10.58
Sur	1037	3.57	9.36
S 22.5° O	1334	3.74	11.43
S 45° O	935	3.44	10.99
S 67.5° O	6623	5.36	12.43
Oeste	2099	3.34	10.09
N 67.5° O	835	2.51	16.41
N 45° O	1725	4.92	16.49
N 22.5° O	1464	3.17	11.35

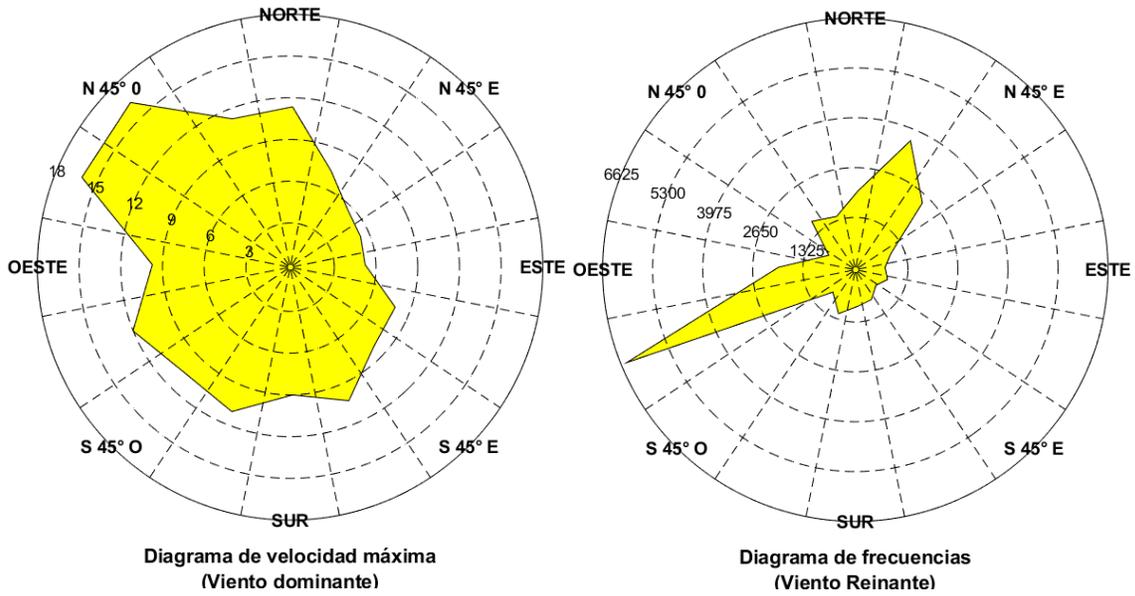


Figura 1.4 Graficas del viento reinante (mayor frecuencia) y del viento dominante (mayor intensidad) por dirección- Régimen Anual.

Tabla 1.4 Frecuencias cruzadas de la magnitud del viento – dirección – régimen anual.

Dirección	velocidad (m/s)													Total	%
	<2,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00	40,00	>50,0		
NORTE	2756	3119	138	20	9	1								6044	7,20
N 22.5° E	4223	8098	350	22								1		12693	15,12
N 45° E	2952	4171	136	1		1								7261	8,65
N 67.5° E	1354	890	37	1	1	1	1							2285	2,72
ESTE	797	888	289	72	9	4								2059	2,45
S 67.5° E	608	1744	591	127	36	4						2		3112	3,71
S 45° E	431	1043	606	242	47	18				3				2390	2,85
S 22.5° E	427	959	1042	256	10	1								2695	3,21
SUR	338	1174	1326	108	9									2955	3,52
S 22.5° O	330	1352	2027	95	11	1								3816	4,55
S 45° O	416	1082	595	118	20	5								2236	2,66
S 67.5° O	742	2630	5888	6066	2073	345	12						1	17757	21,15
OESTE	1070	2834	3464	1845	561	101	4	1						9880	11,77
N 67.5° O	924	1139	506	116	19	16	13	1	1			3		2738	3,26
N 45° O	1011	883	349	363	247	91	42	5	1			1		2993	3,57
N 22.5° O	1315	1096	312	216	75	16								3030	3,61
<b>Total</b>	19694	33102	17656	9668	3127	605	75	7	2	0	7	1	0	83944	
<b>%</b>	23,46	39,43	21,03	11,52	3,73	0,72	0,09	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00		

### 1.3 Información de marea

El ascenso y descenso periódico del nivel del agua que resulta de la atracción gravitacional de la luna y el sol y otros cuerpos astronómicos actuando sobre la rotación de la tierra es conocida como marea. Es el periodo de marea entre el nivel alto de agua (pleamar) y el subsiguiente nivel bajo de agua (bajamar), y que tiene asociada una corriente de reflujo. Las mareas se clasifican como semidiurnas, diurnas y mixtas.

- La marea semidiurna, se presentan dos pleamares y dos bajamares durante dos ciclos sucesivos, con periodo de 12 horas y 25 minutos cada uno (promedio); las amplitudes son sensiblemente semejantes.
- La marea diurna, tiene una pleamar y una bajamar por ciclo en un periodo de 24 horas y 20 minutos
- La marea mixta, se presentan dos pleamares y dos bajamares durante dos ciclos sucesivos, con periodo de 12 horas y 25 minutos cada uno (promedio), es una combinación de mareas diurnas y semidiurnas y se caracterizan por una gran desigualdad en cualquiera de los niveles.

Para la caracterización de la marea se realizó mediante las principales componentes armónicas. En el puerto de Manzanillo la marea se clasificó como mixta semidiurna. este tipo de marea presentan dos pleamares y dos bajamares durante dos ciclos sucesivos, con periodos de 12 horas y 25 minutos cada uno (promedio), las amplitudes de ambas son sensiblemente semejantes.

**Tabla 1.5 Niveles de mareas en el puerto de Manzanillo (información tomada de las tablas de medición de mareas, 1993).**

Nivel de pleamar media superior	0.333 m.
Nivel de pleamar media	0.272 m.
Nivel medio del mar	0.000 m.
Nivel de bajamar media	-0.264 m.
Nivel de bajamar media inferior	-0.398 m.

Tomando en cuenta lo anterior, la información de la marea se obtuvo generando un pronóstico para el año 2020, estos valores de los niveles del mar se presentan en las figuras 1.5 a 1.10.

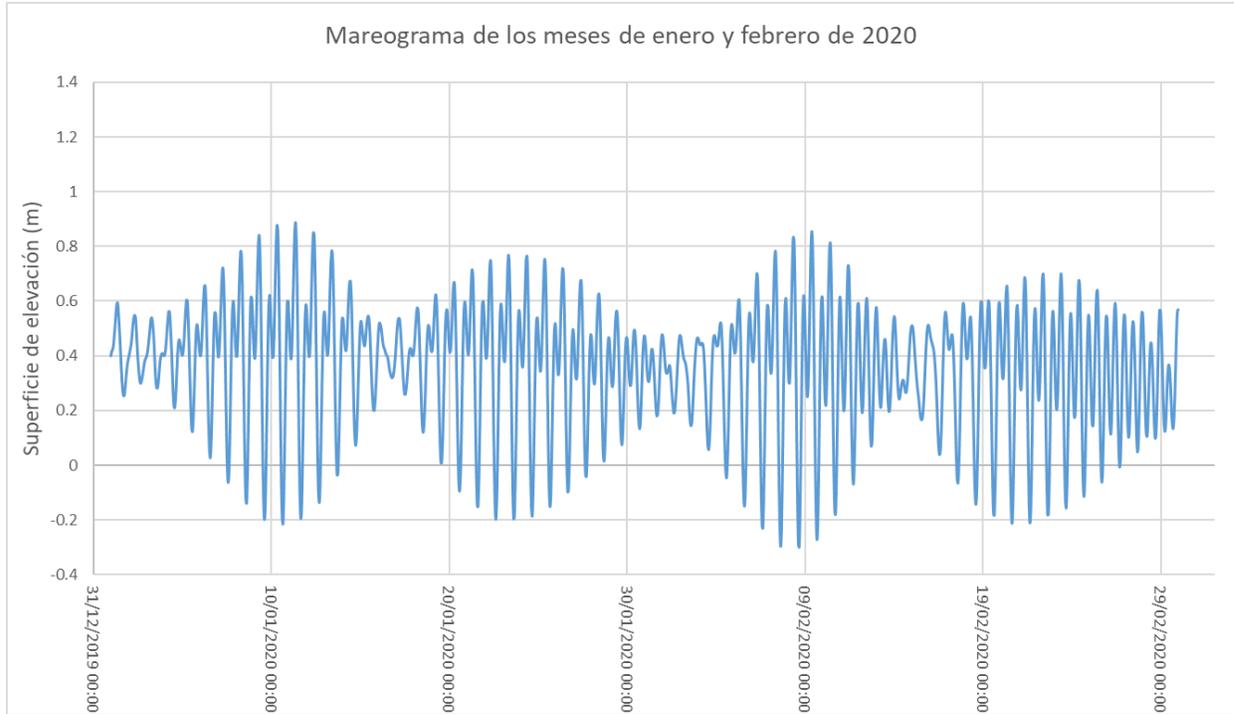


Figura 1.5 Graficas de la elevación del nivel del mar para los meses de enero y febrero del 2020.

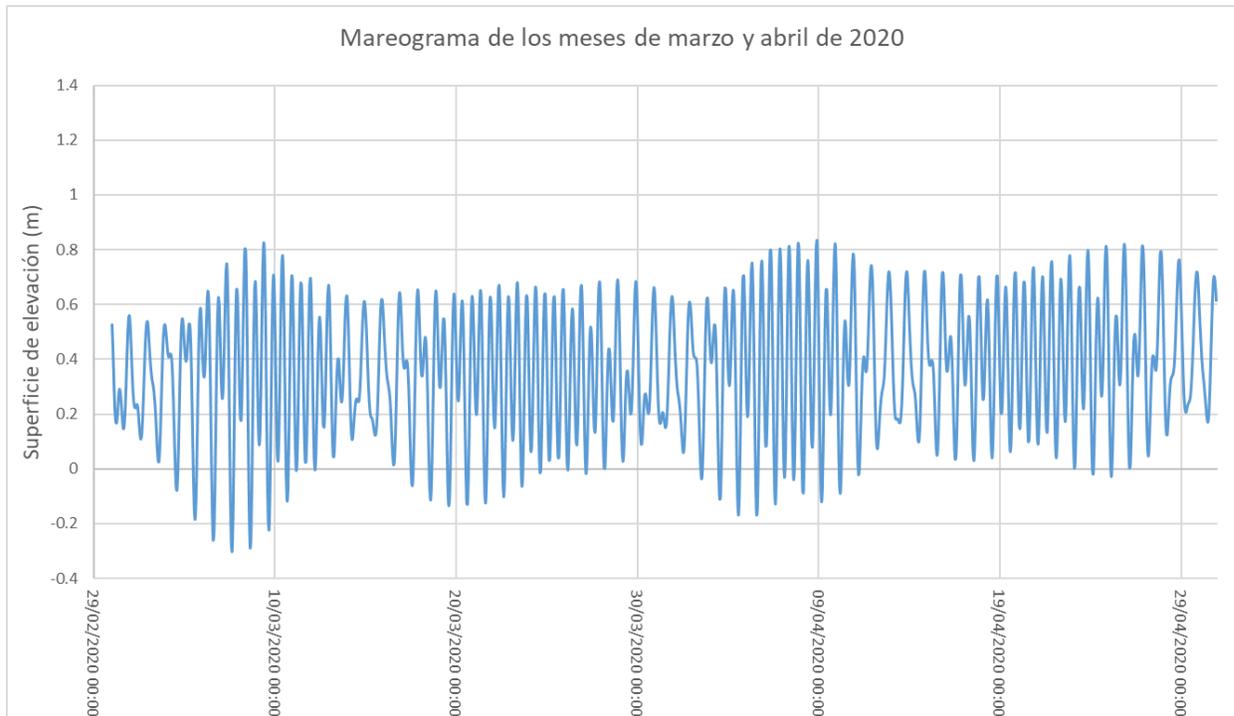
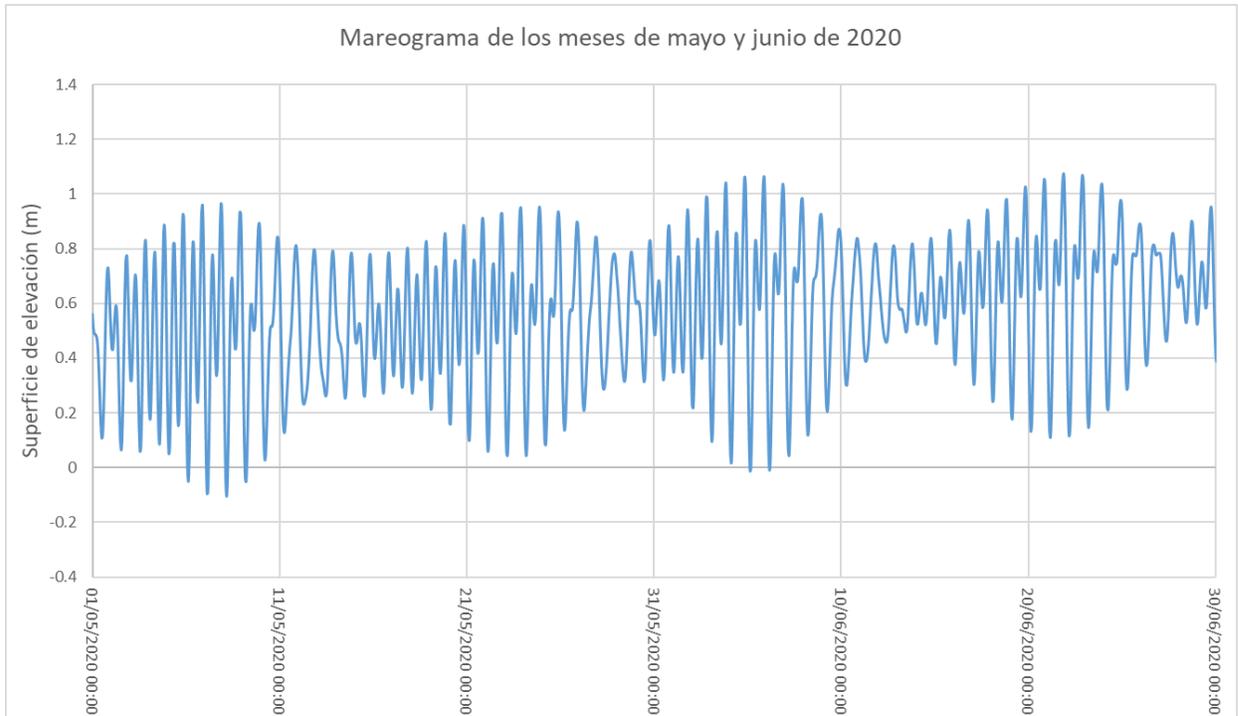
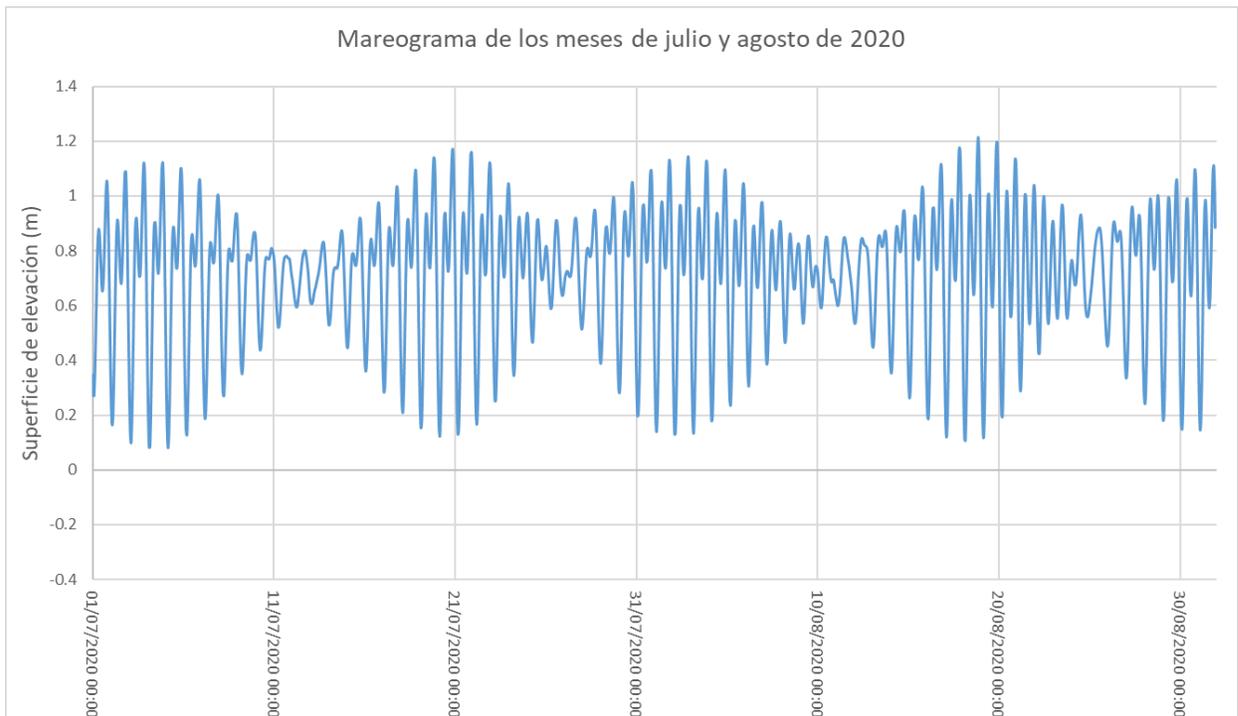


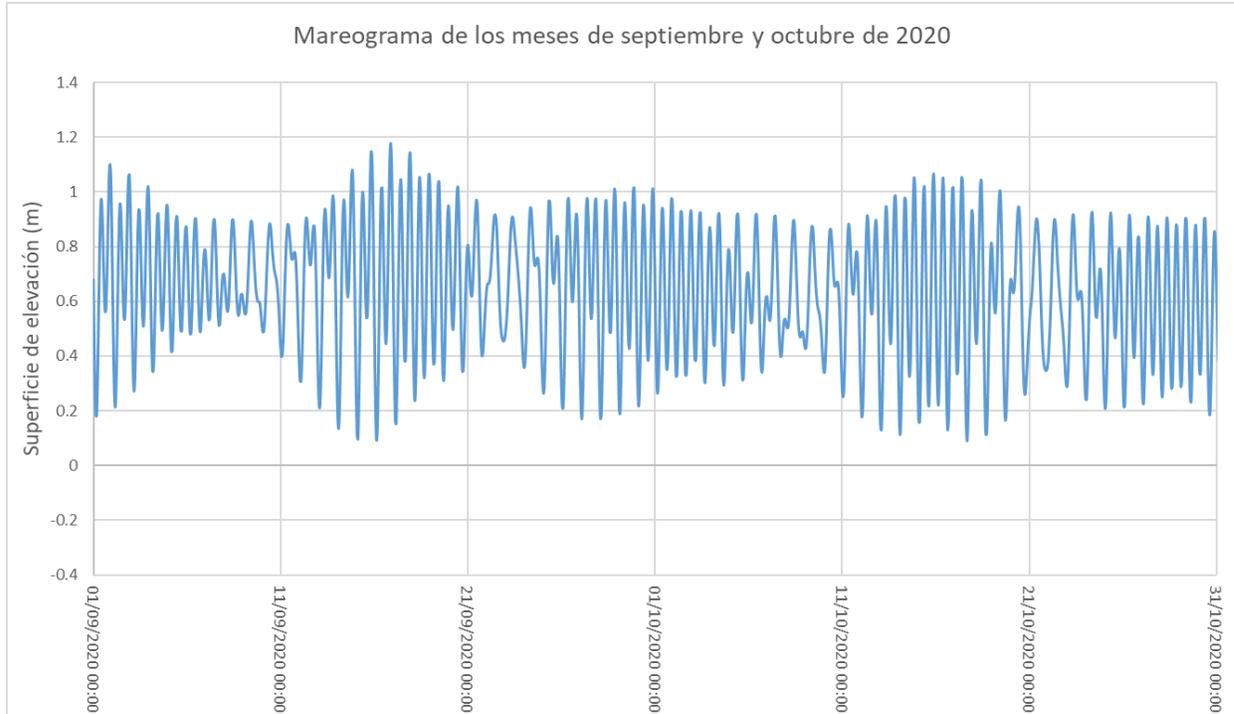
Figura 1.6 Graficas de la elevación del nivel del mar para los meses de marzo y abril del 2020.



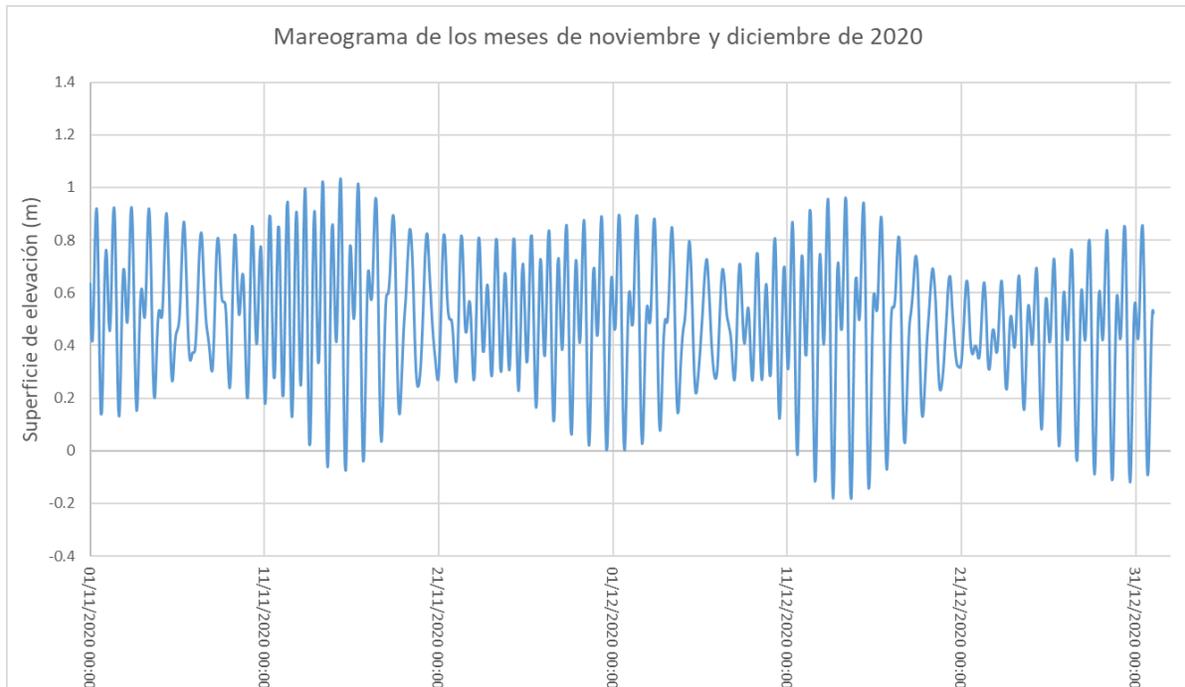
**Figura 1.7** Graficas de la elevación del nivel del mar para los meses de mayo y junio del 2020.



**Figura 1.8** Graficas de la elevación del nivel del mar para los meses de julio y agosto del 2020.



**Figura 1.9** Grafica de la elevación del nivel del mar para los meses de septiembre a octubre del 2020.



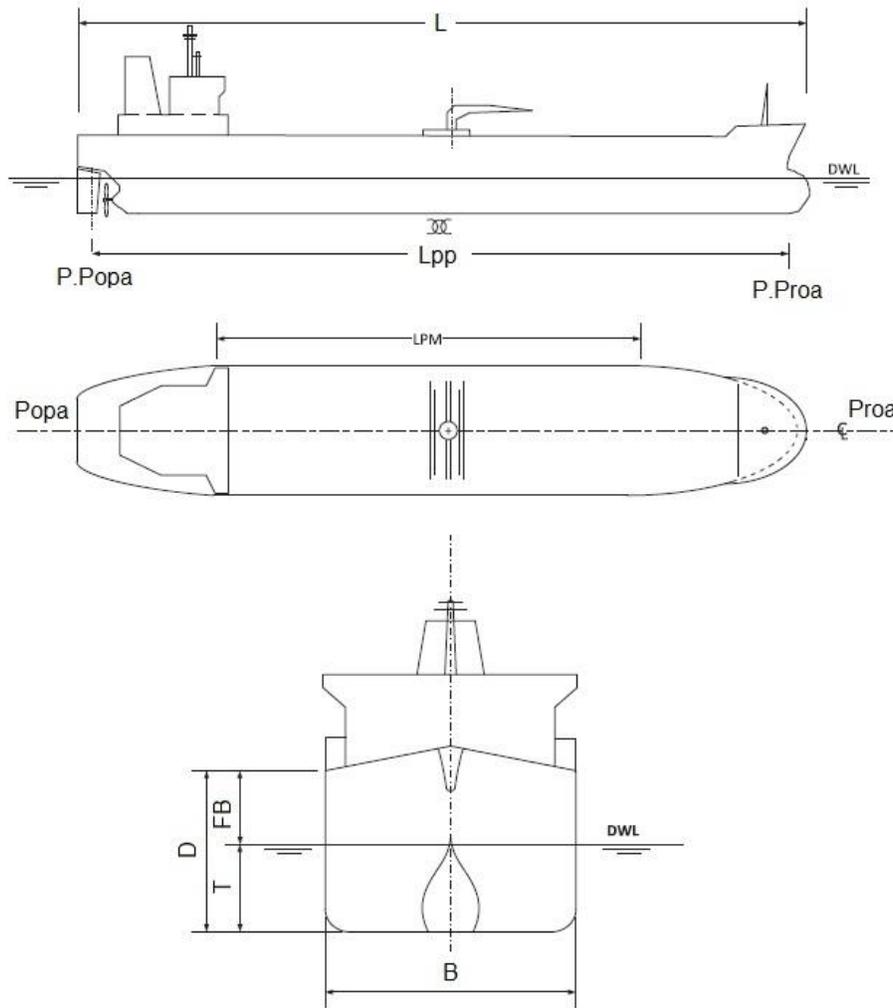
**Figura 1.10** Grafica de la elevación del nivel del mar para los meses de noviembre y diciembre del 2020.

## 2. Análisis y características de los barcos

---

Las dimensiones principales de un barco, las configuraciones generales y el modo de transferencia de la carga son de importancia primordial en el análisis de amarre y en el diseño final de la estructura de atraque. Las definiciones importantes y comunes en todos los tipos de barcos en relación con sus dimensiones y tamaños principales se definen a continuación.

El extremo delantero del barco se le conoce como proa y la parte posterior como popa. La distancia horizontal desde el extremo delantero de la proa hasta el extremo más alejado de popa es la eslora total (LOA, por sus siglas en inglés), que es gran importancia para el dimensionamiento de la zona de atraque, la exposición al viento y las ubicaciones extremas de las líneas de amarre. La eslora de flotación (LWL, por sus siglas en inglés) es la distancia horizontal donde se intersecta la proa y popa con la superficie del agua, por lo general, es la línea de flotación de diseño, ya que, esta dimensión puede variar con la condición de carga del buque y es crítica en el cálculo de cargas hidrodinámicas. La eslora entre perpendiculares (LBP, por sus siglas en inglés) es la distancia horizontal entre la perpendicular de proa que se encuentra en la intersección de la línea de flotación con la proa y la perpendicular de popa se encuentra en el centro del eje de la mecha de la pala del timón, la eslora entre perpendiculares es la dimensión que se utiliza con mayor frecuencia en los planos y registros de la embarcación. Para la mayoría de los tipos de barcos comerciales, incluidos petroleros, graneleros, portacontenedores y barcos con formas de casco similares, la LBP es del orden del 96% de la eslora total (LOA). La eslora del cuerpo medio paralelo (LPM, por sus siglas en inglés), que varía de acuerdo al calado es importante para determinar la longitud de contacto con las defensas. Para barcos tanques, la distancia de proa hacia los múltiples de carga/descarga (manifolds) para la ubicación del buque a lo largo del muelle. El ancho del buque, denominado manga (B, por su sigla en inglés) y la manga en la línea de flotación suelen ser iguales. La distancia vertical del casco, denominada puntal (D). El calado es la distancia vertical de la superficie del agua al fondo del casco, la cual varía con las condiciones de carga, y a menudo, a lo largo del buque. El calado que se utiliza usualmente es el de la condición de carga de diseño y esta designado por la letra T, como es típicamente usado en ingeniería naval. El francobordo (FB, por sus siglas en inglés) es la diferencia entre el puntal y el calado. El calado de aire es la distancia vertical por encima de la línea de flotación y es de importancia para cálculos del efecto del viento y tener distancia suficiente para pasar por debajo de puentes u otras obstrucciones.



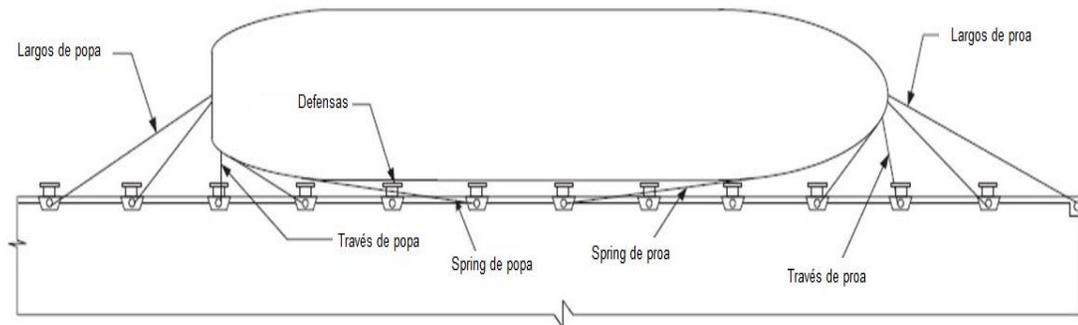
**Figura 2.1** Esquema de las dimensiones principales de un barco.

En general un puerto es una zona que provee las instalaciones necesarias para atracar y amarrar el buque para la transferencia de la carga, pasajeros, servicios y/o reparaciones. Usualmente se ubican dentro de los estuarios en las desembocaduras de los ríos o a lo largo de los ríos tierra adentro.

La exposición del sitio a las direcciones predominantes de viento, olas y corriente es extremadamente importante para determinar los criterios de diseño para el análisis de amarre.

Un arreglo de amarre se refiere en general a la disposición y la geometría de las líneas a amarre, incluyendo el tipo y tamaño y la localización, tipo y capacidades de los equipos al que están conectados.

El arreglo de amarre, generalmente se puede clasificar en tres tipos. El más común es a lo largo del muelle, usualmente asociado con barcos de carga general, portacontenedores y otros muelles de uso general. Las defensas están espaciadas entre sí en un rango del 8 al 15% de la eslora del buque (ver figura 2.2).



**Figura 2.2** Arreglo de amarre típico a lo largo del muelle

## 2.1 Barcos atracados

De acuerdo a la base de datos estadísticos referida de la Administración Portuaria Integral de Manzanillo, S. A. de C. V., del 2011 al 2019 al puerto de Manzanillo; en las bandas A, B y C, muestran que los barcos atracados se encuentran principalmente en las bandas A, B y C, las cuales están divididos de la siguiente manera.

- Banda A tramo 2 y 3
- Banda B tramo 4,5 y 6
- Banda C tramo 7,8,9,10,11,12,13 y 14

De acuerdo a esta distribución y a la base de datos, se obtuvieron gráficas para determinar los tipos y tamaños de barcos que arriban al puerto y con ello se

seleccionará el modelo de barco que se utilizará en las simulaciones con el simulador de embarcaciones en tiempo real, dichas gráficas se muestran a continuación

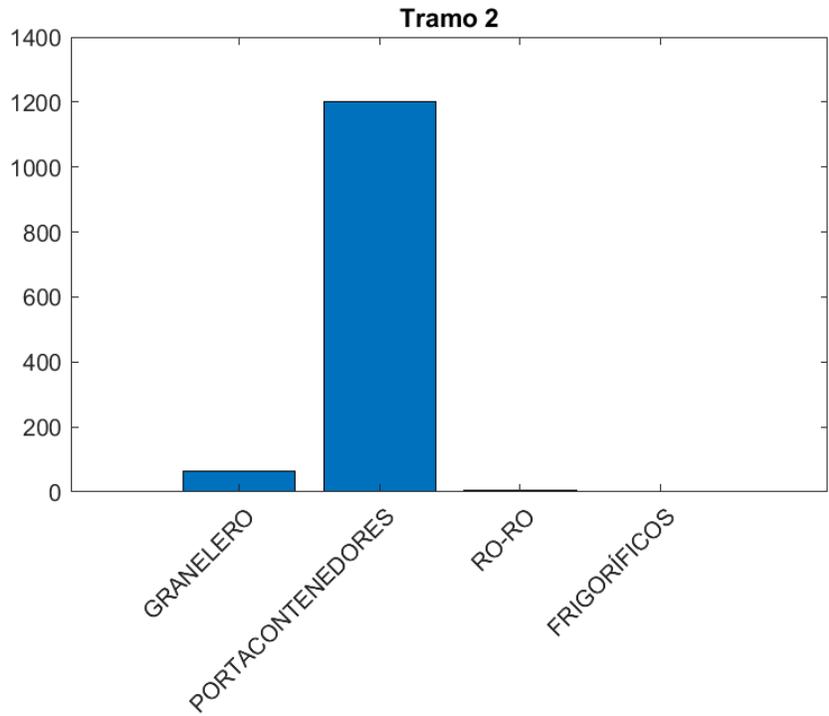


Figura 2.3 número de arribos vs tipo de barcos

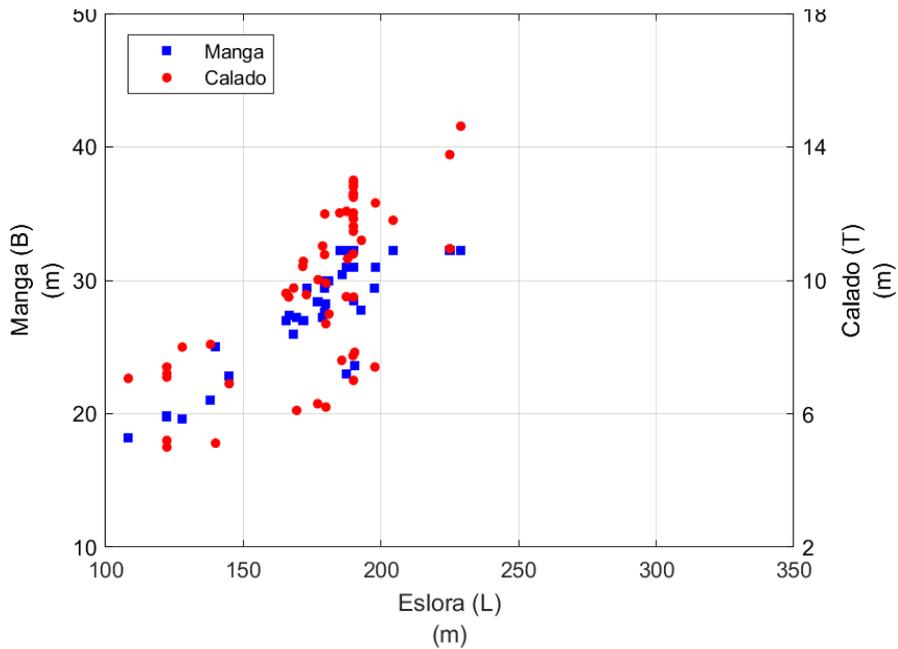


Figura 2.4 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 2 y un barco granelero.

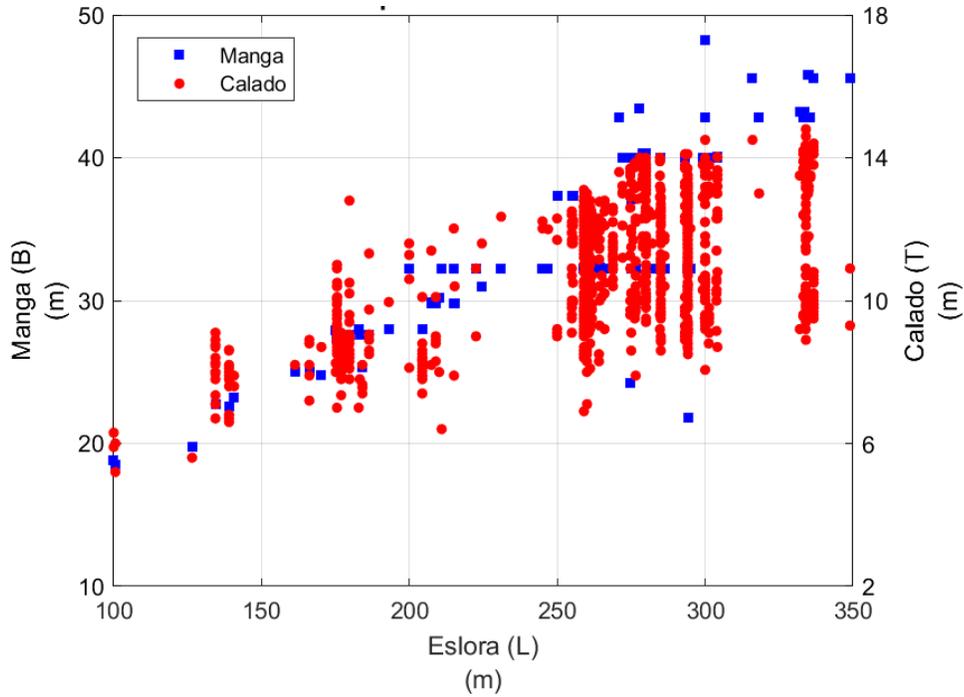


Figura 2.5 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 2 y un barco portacontenedor.

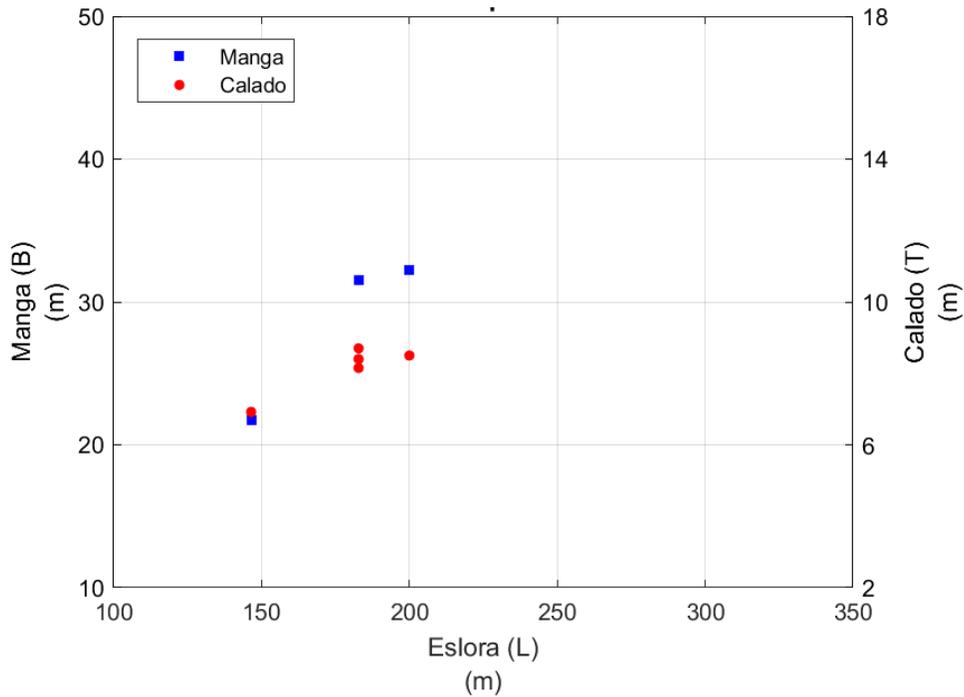


Figura 2.6 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 2 y un barco Ro-Ro.

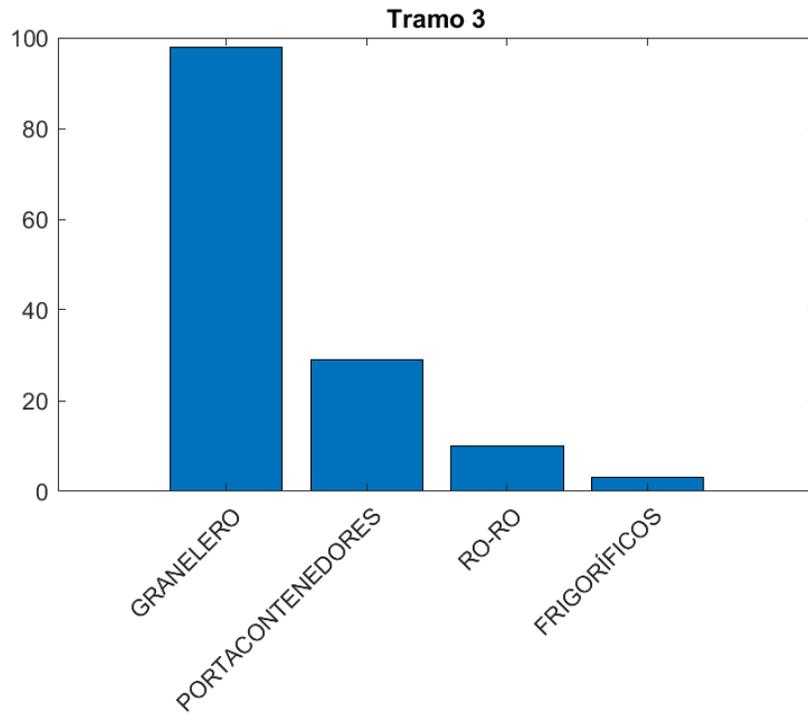


Figura 2.7 Número de arribos vs tipo de barcos.

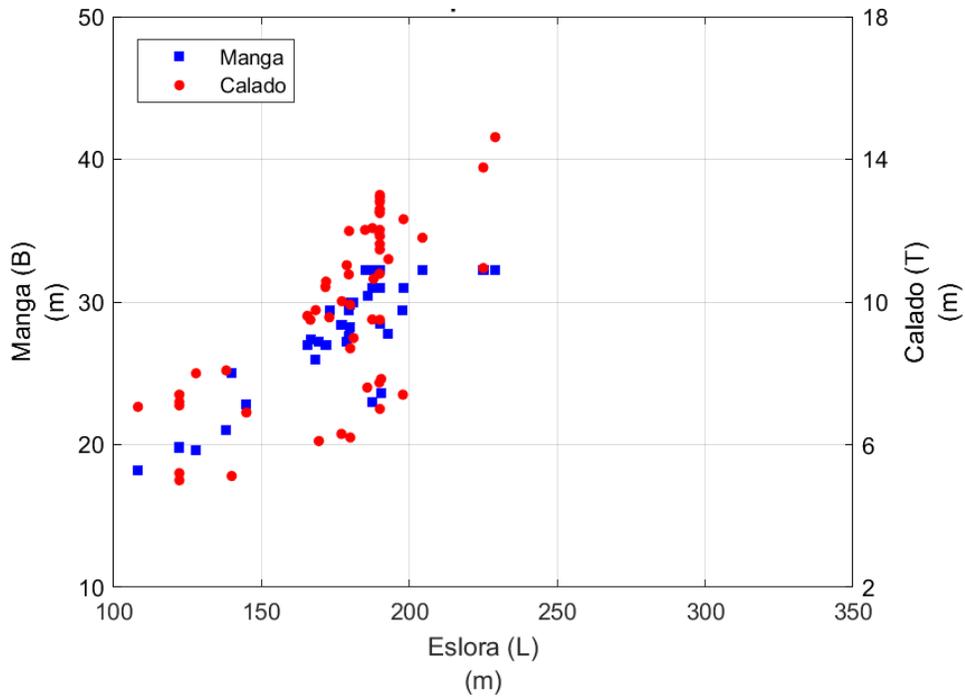


Figura 2.8 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 3 y un barco granelero.



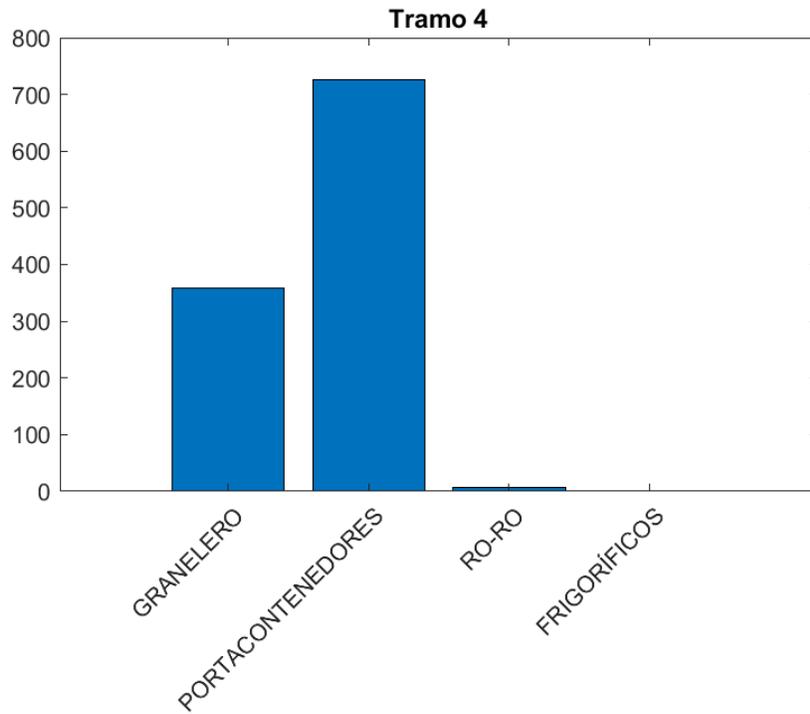


Figura 2.11 Número de arribos vs tipo de barcos.

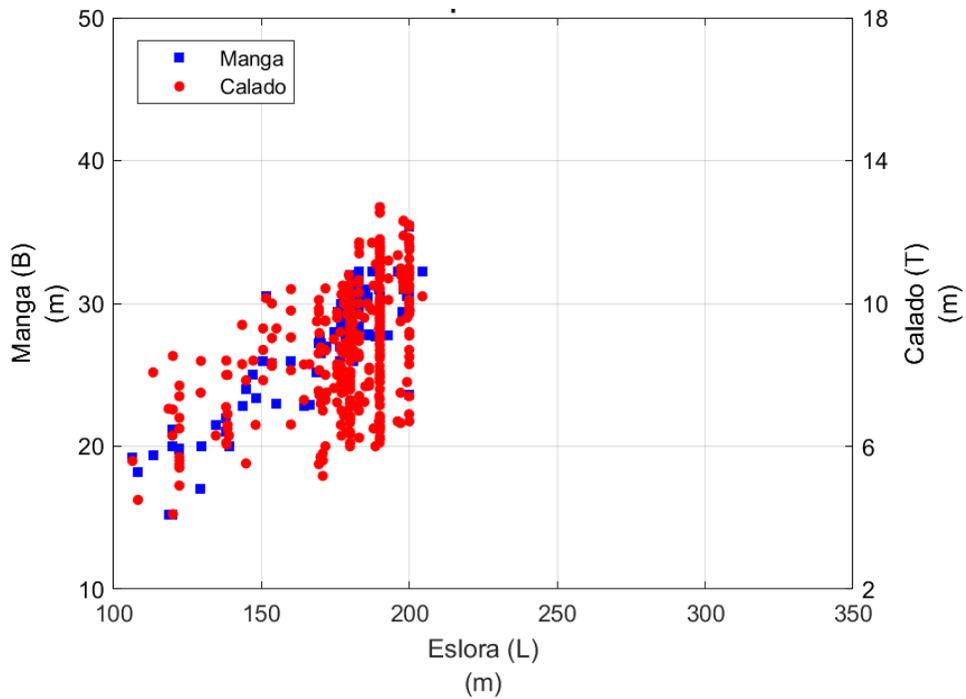


Figura 2.12 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 4 y un barco granelero.

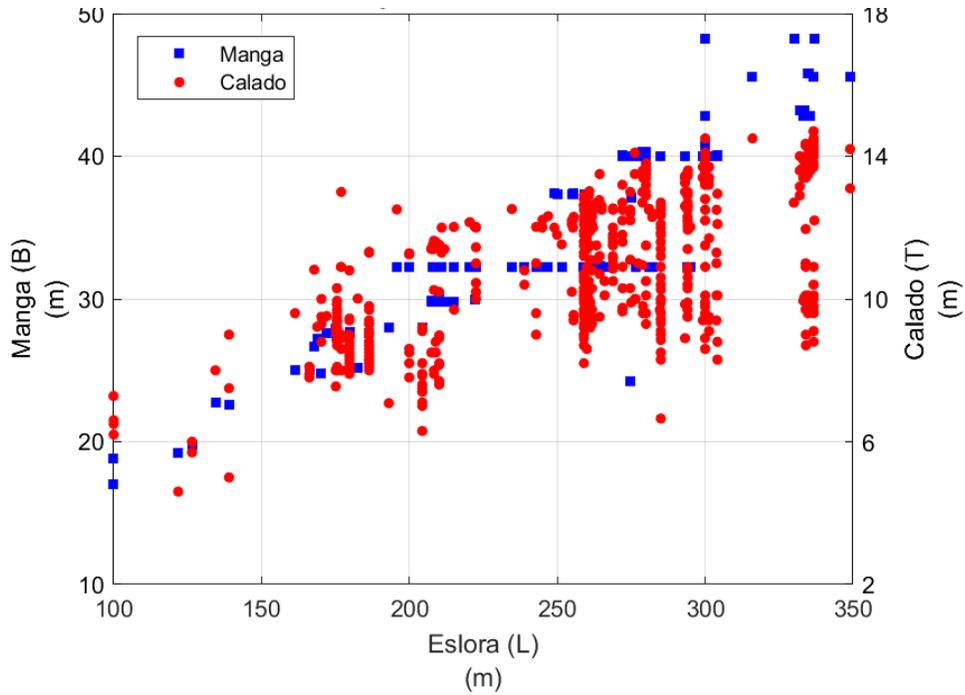


Figura 2.13 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 4 y un barco portacontenedor.

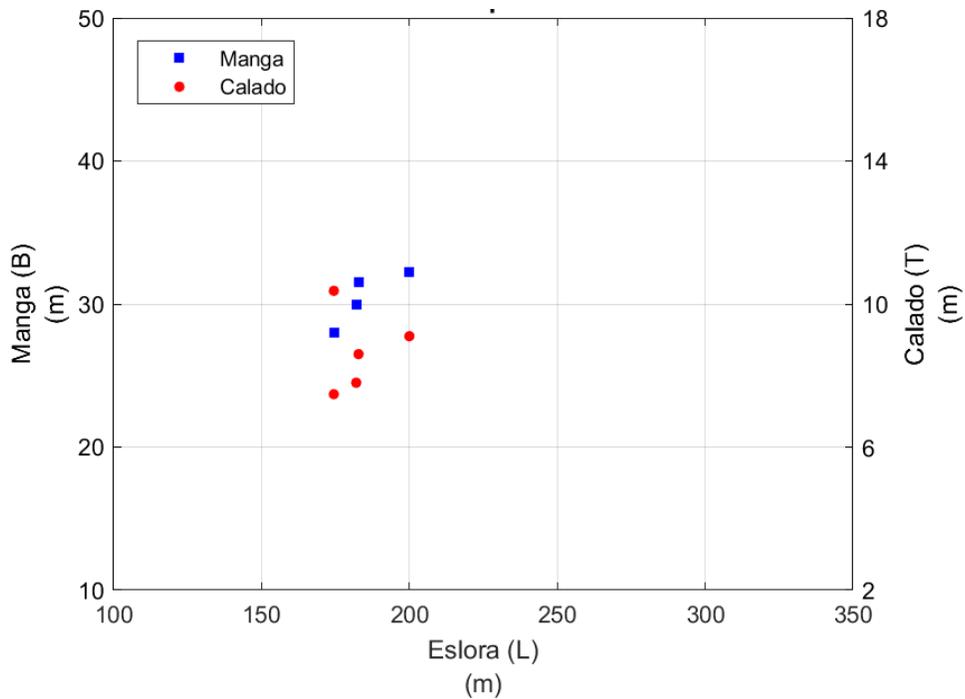


Figura 2.14 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 4 y un barco Ro-Ro.

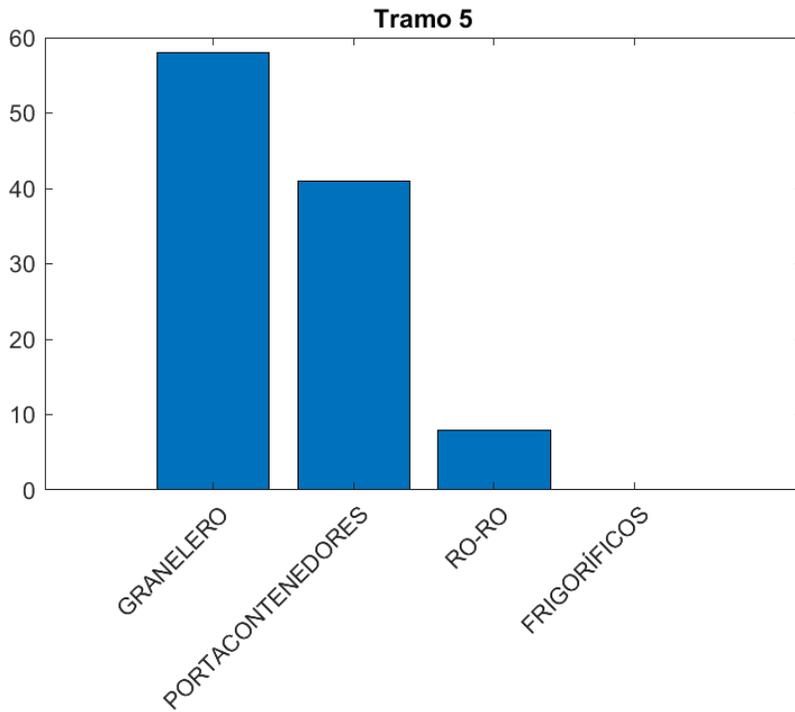


Figura 2.15 Número de arribos vs tipo de barcos.

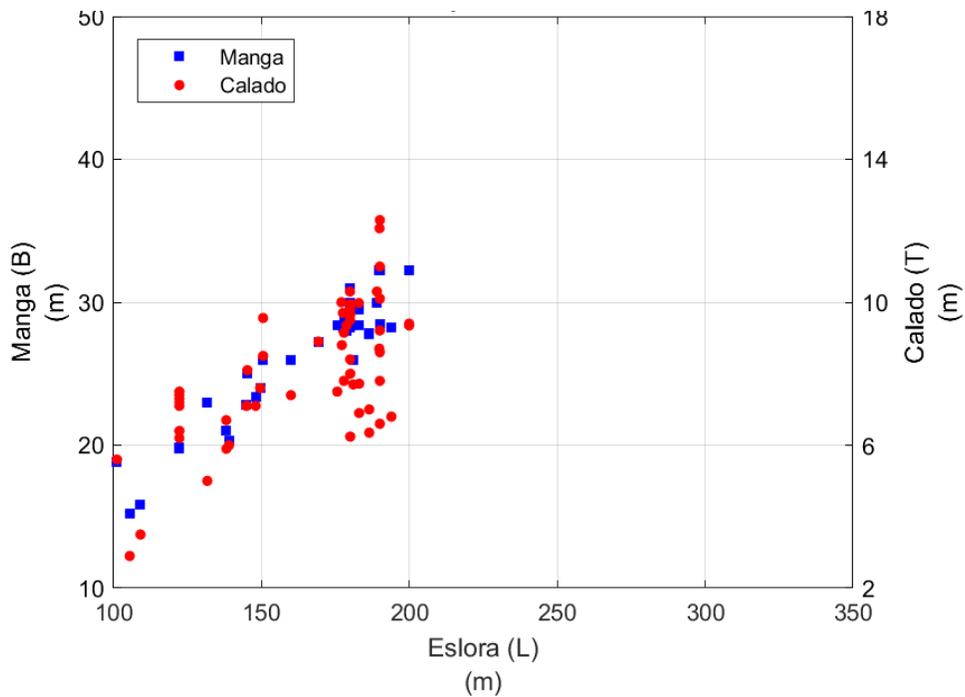
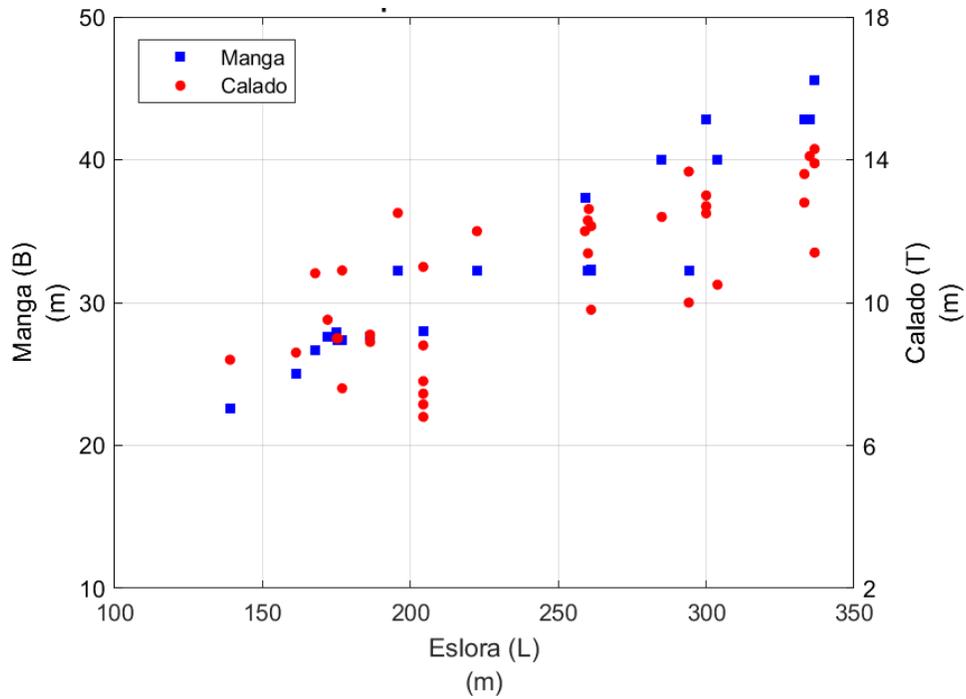
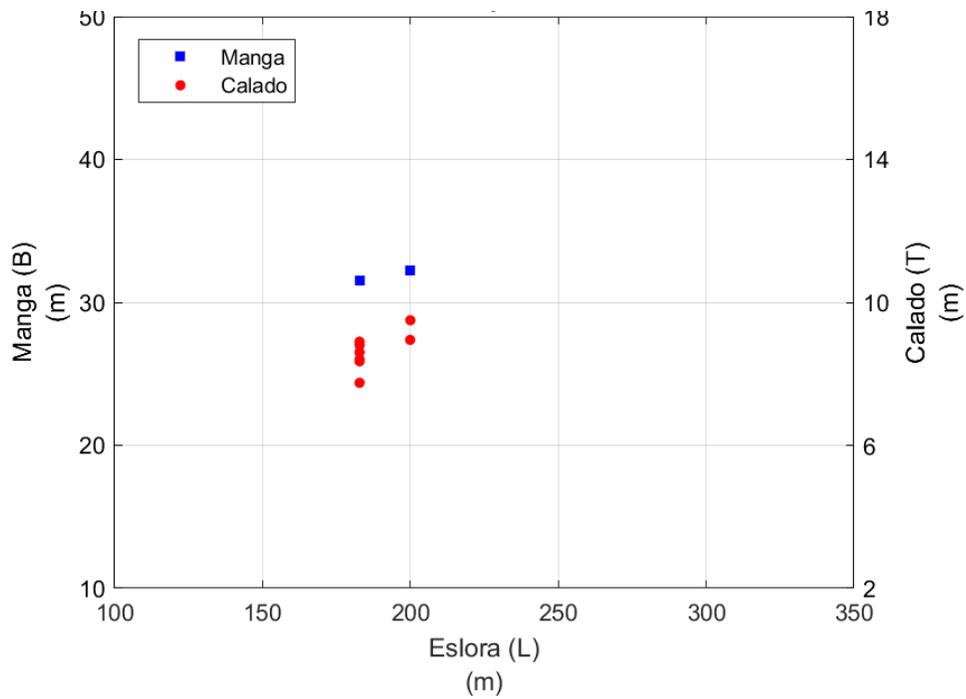


Figura 2.16 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 5 y un barco granelero.



**Figura 2.17** Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 5 y un barco portacontenedor.



**Figura 2.18** Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 5 y un barco Ro-Ro.

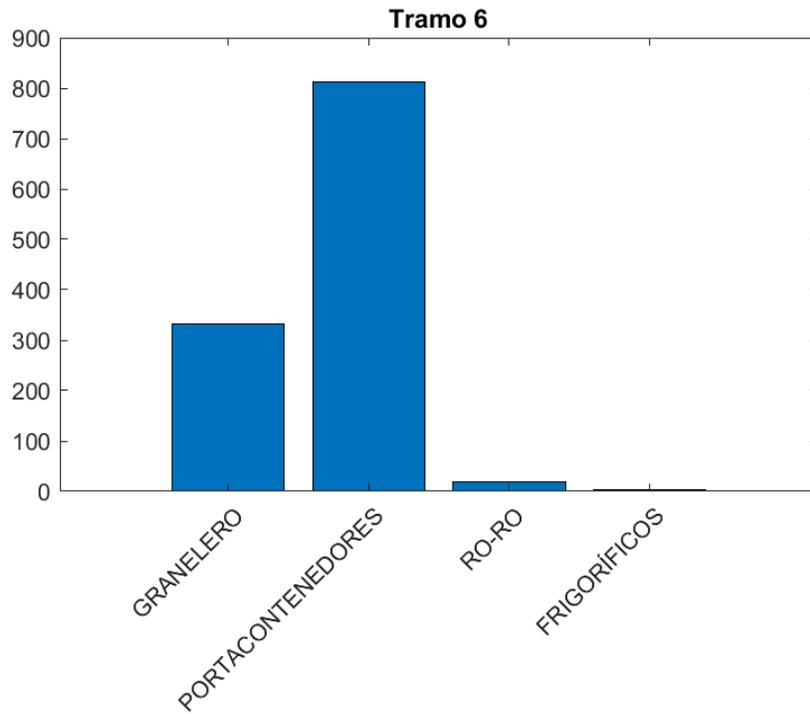


Figura 2.19 Número de arribos vs tipo de barcos.

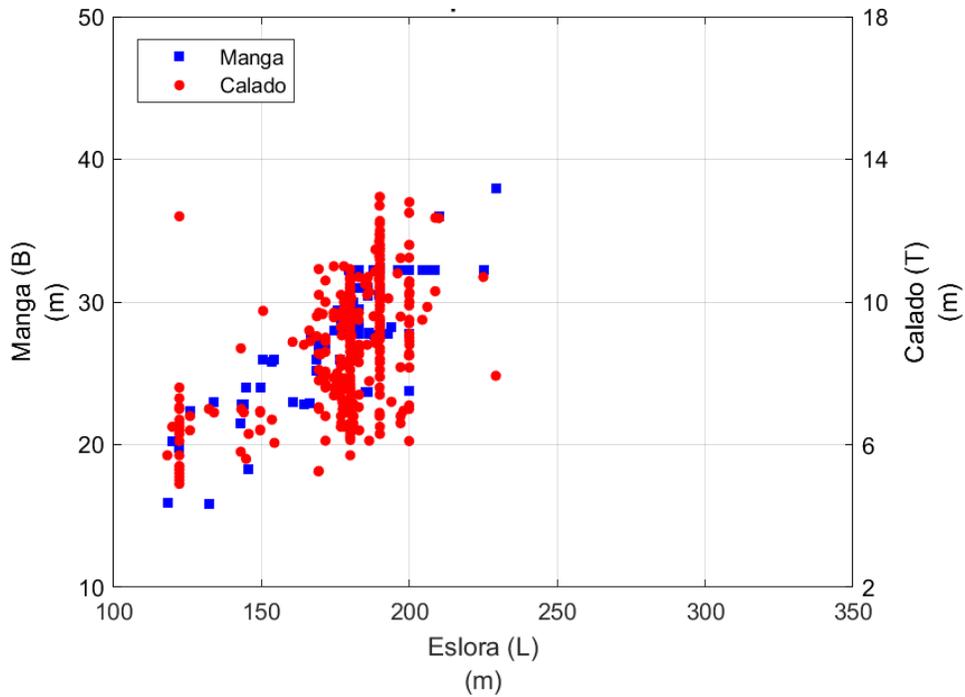


Figura 2.20 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 6 y un barco granelero.

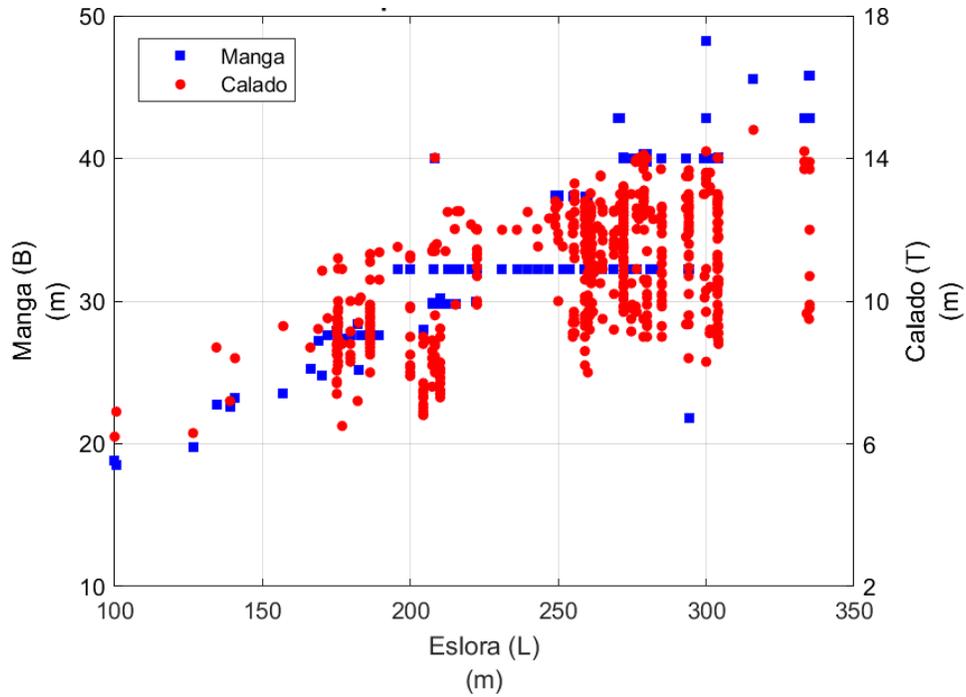


Figura 2.21 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 6 y un barco portacontenedor.

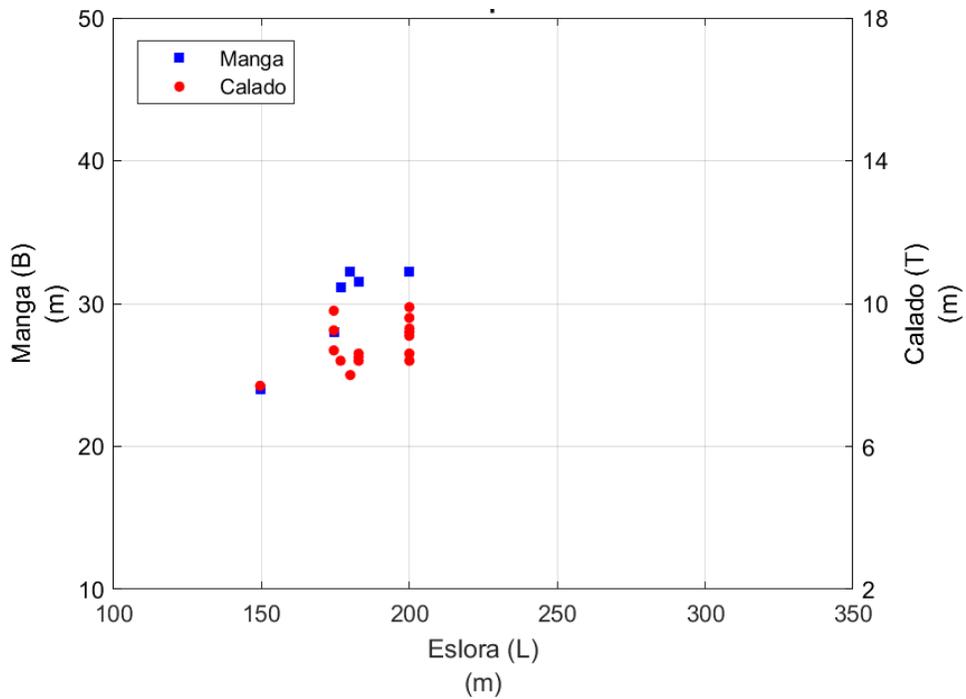


Figura 2.22 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 6 y un barco Ro-Ro.

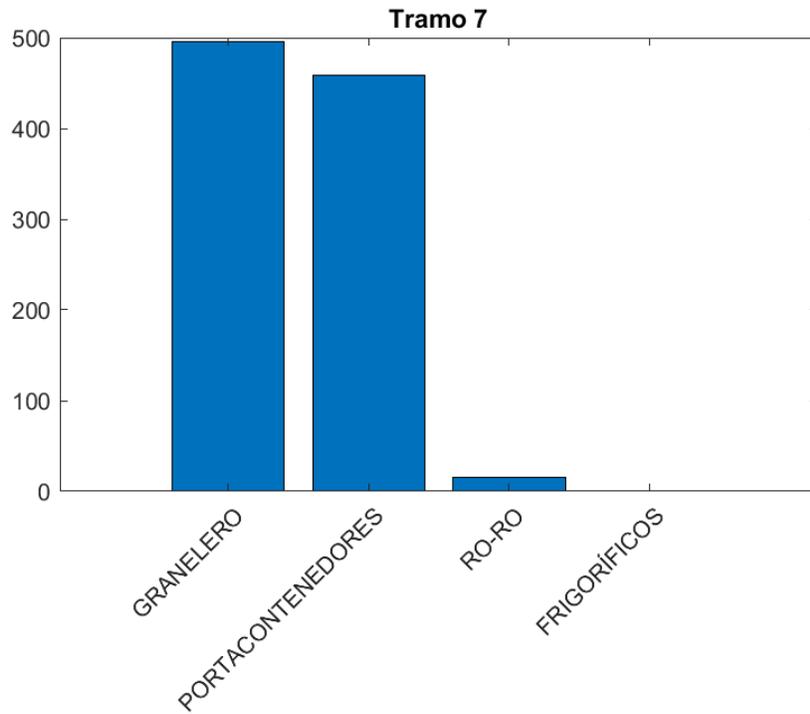


Figura 2.23 Número de arribos vs tipo de barcos.

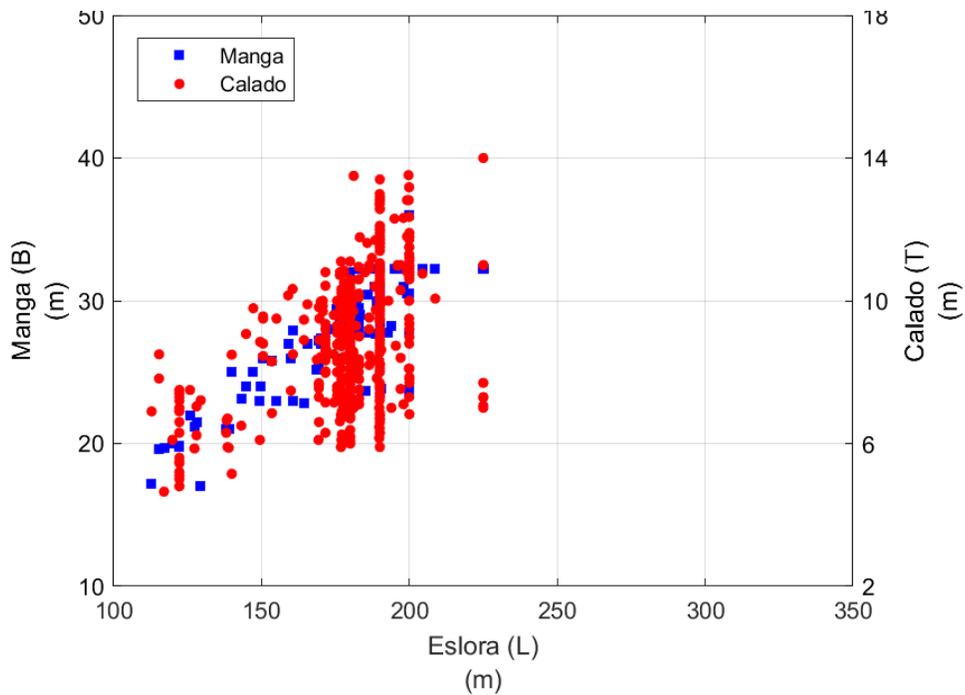


Figura 2.24 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 7 y un barco granelero.

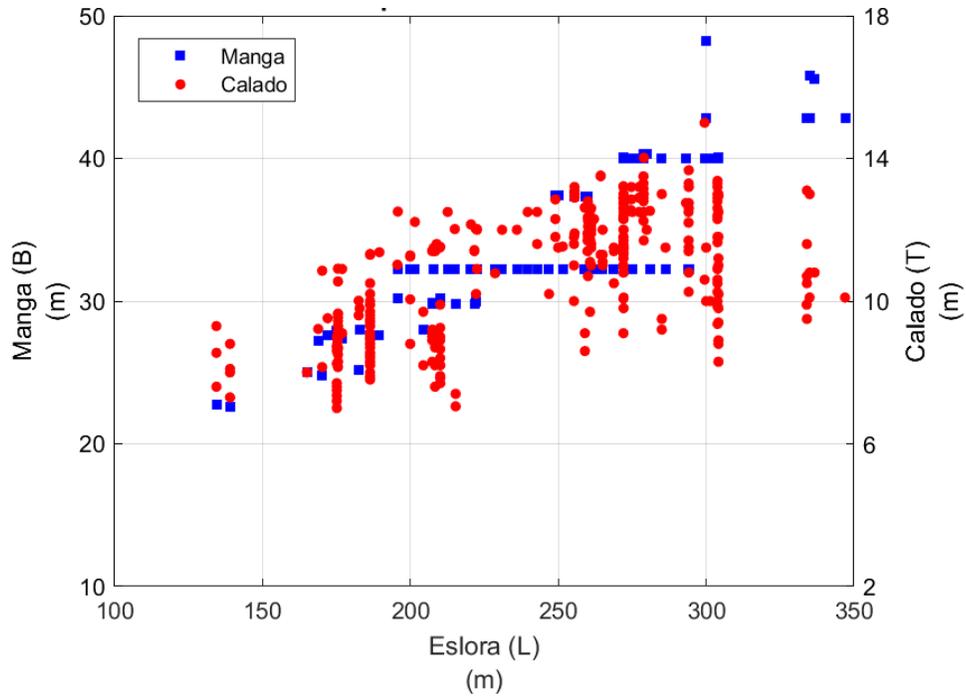


Figura 2.25 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 7 y un barco portacontenedor.

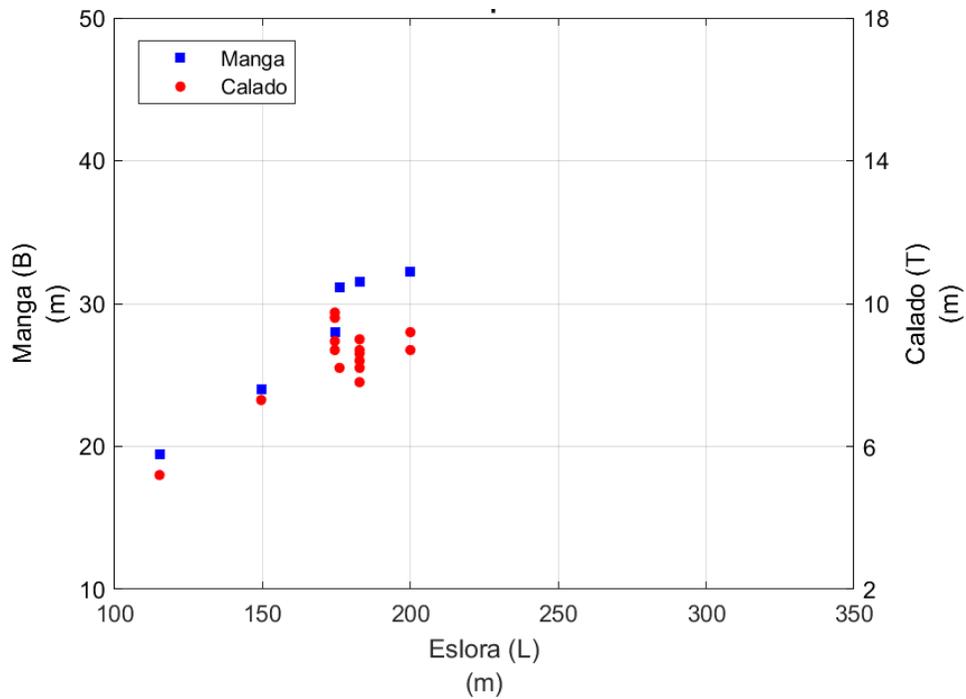


Figura 2.26 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 7 y un barco Ro-Ro.

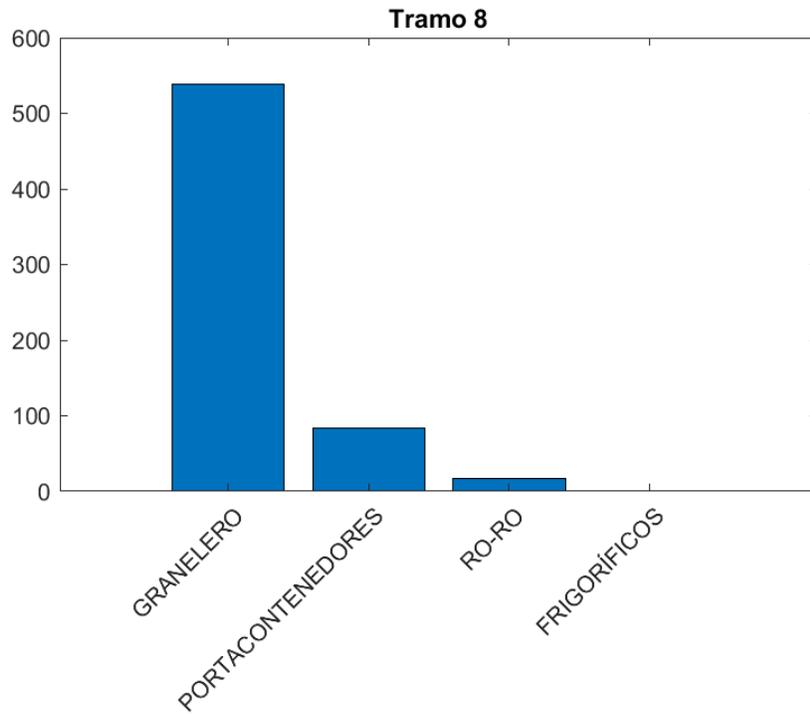


Figura 2.27 Número de arribos vs tipo e barcos.

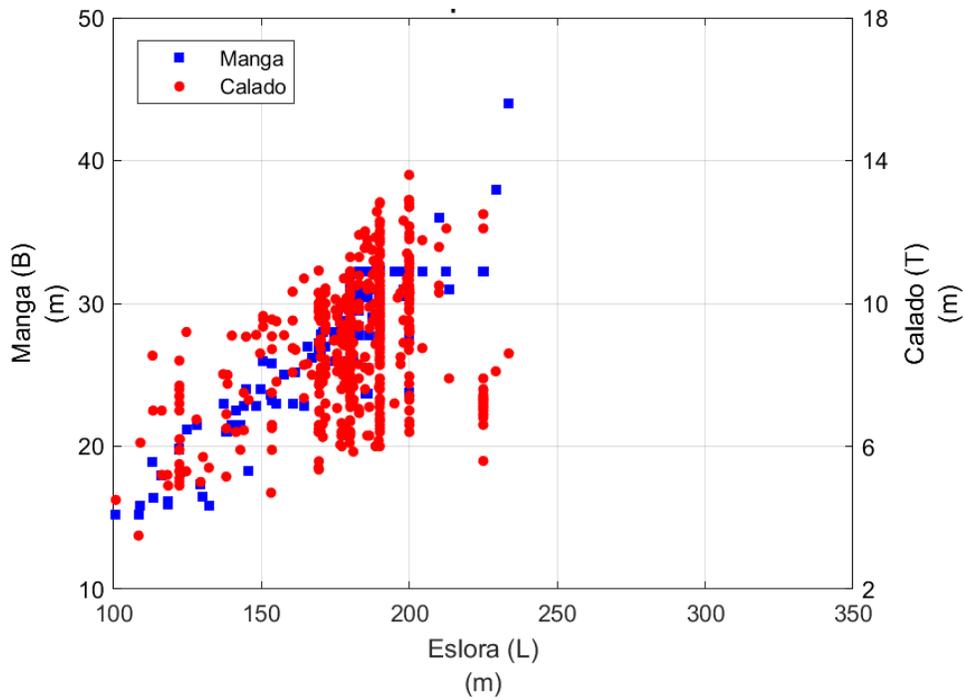
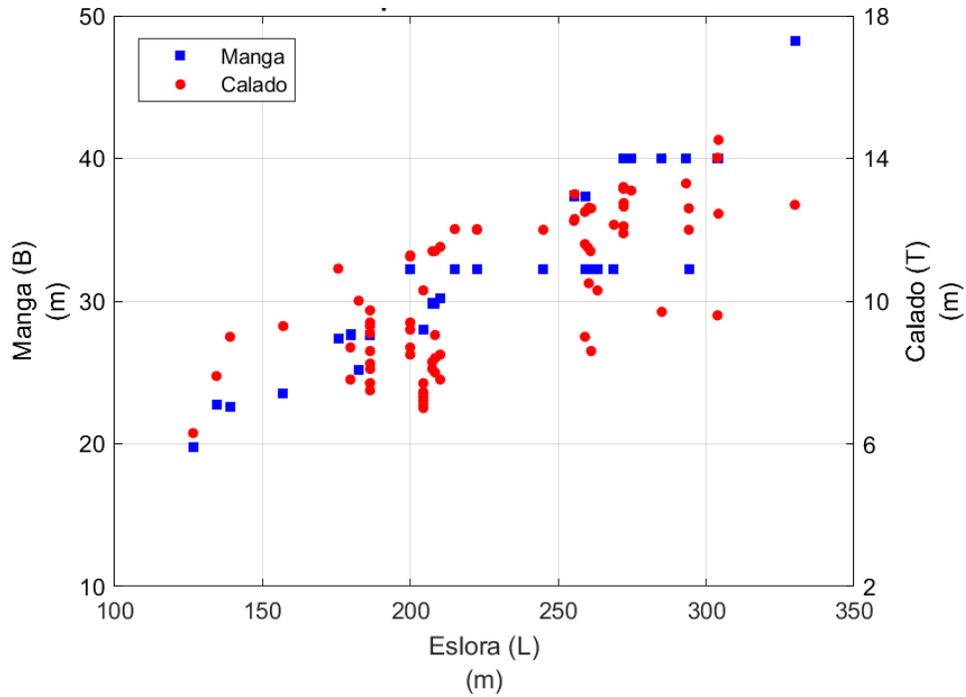
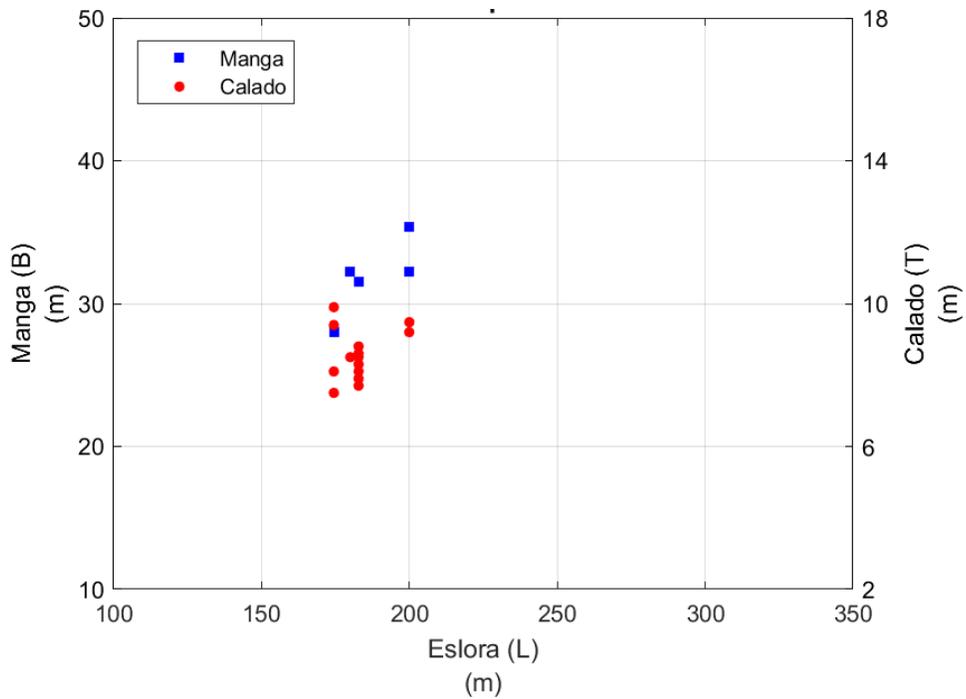


Figura 2.28 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 8 y un barco granelero.



**Figura 2.29** Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 8 y un barco portacontenedor.



**Figura 2.30** Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 8 y un barco Ro-Ro.

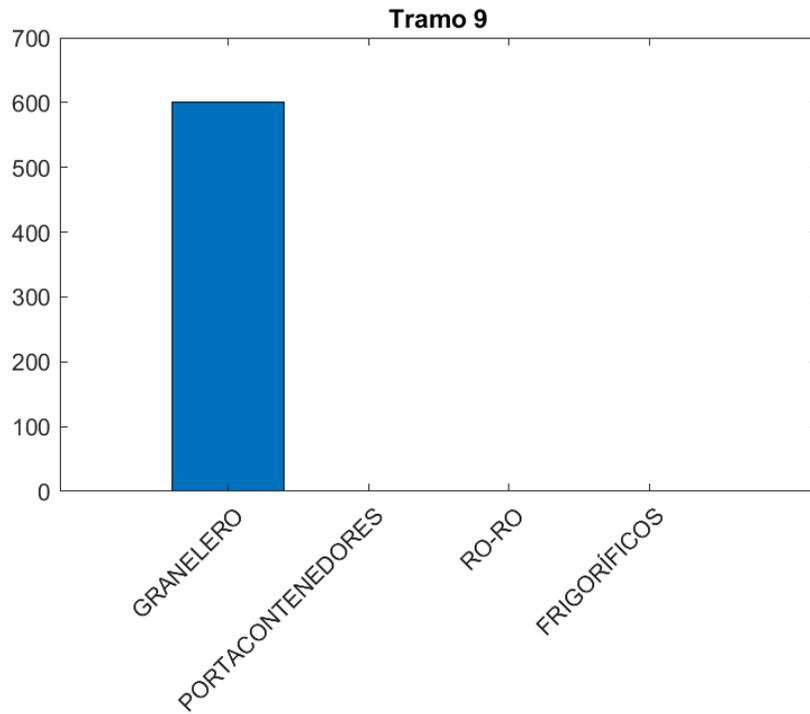


Figura 2.31 Número de arribos vs tipo de barcos.

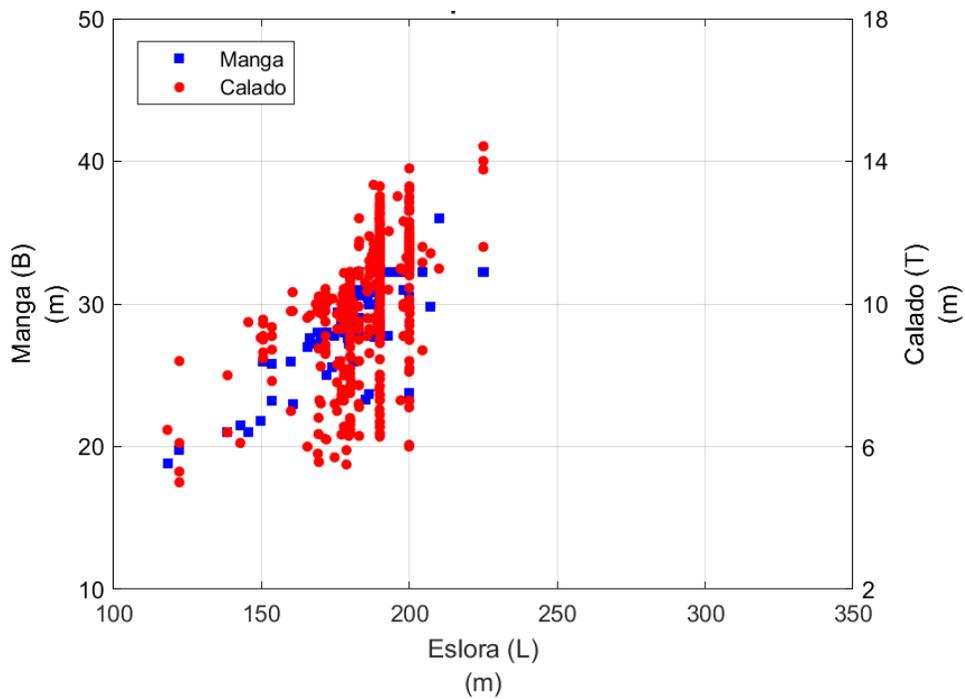


Figura 2.32 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 9 y un barco granelero.

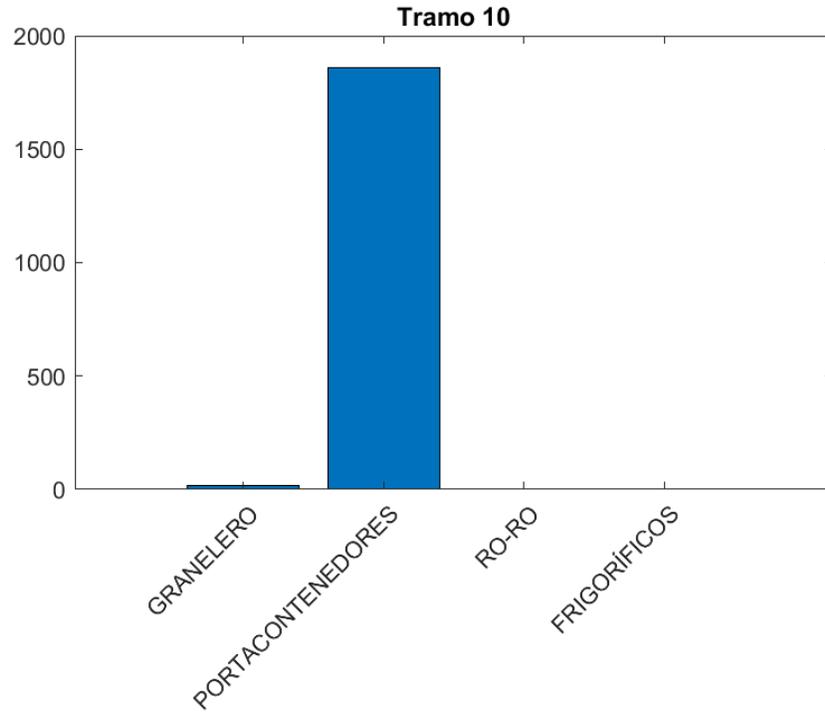


Figura 2.33 Número de arribos vs tipo de barcos.

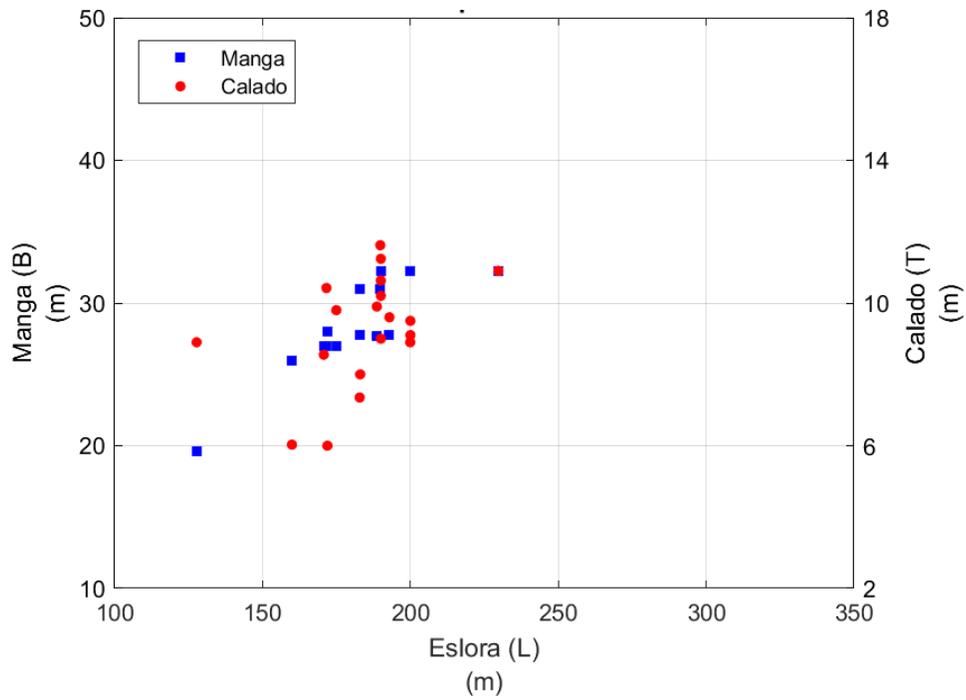


Figura 2.34 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 10 y un barco granelero.

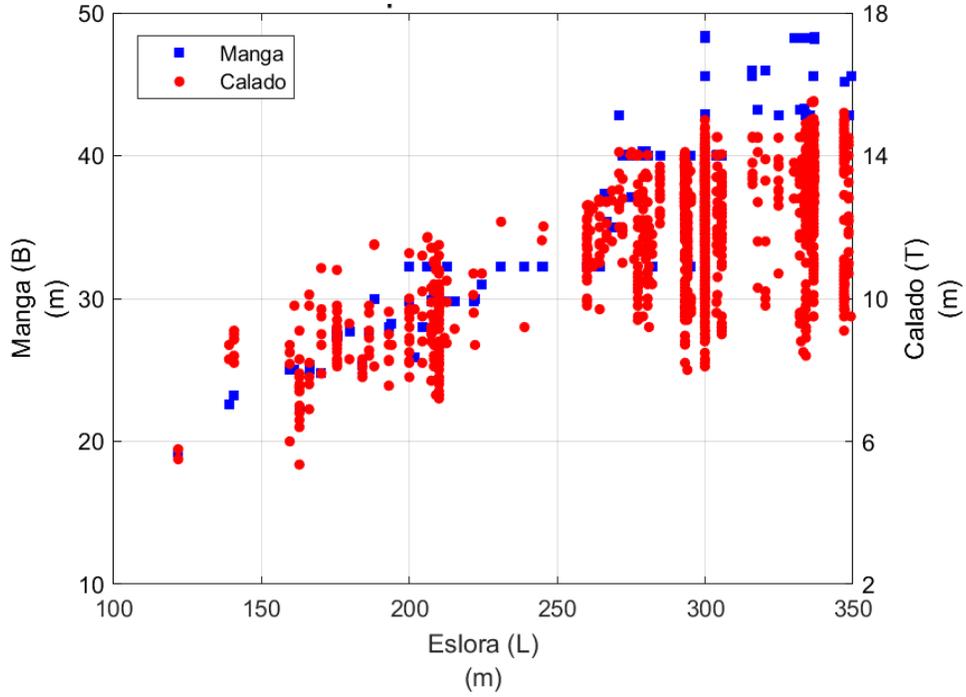


Figura 2.35 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 10 y un barco portacontenedor.

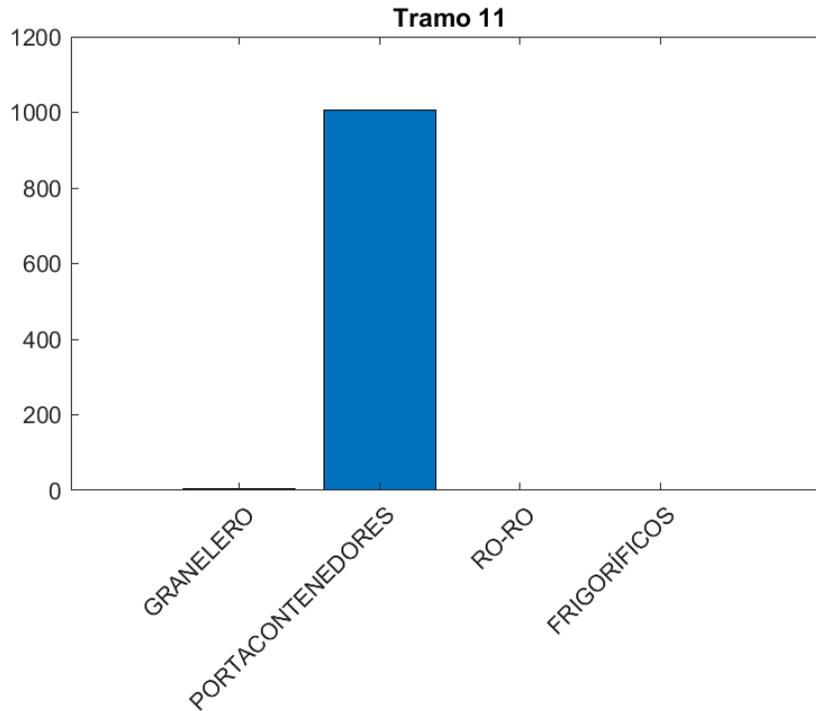
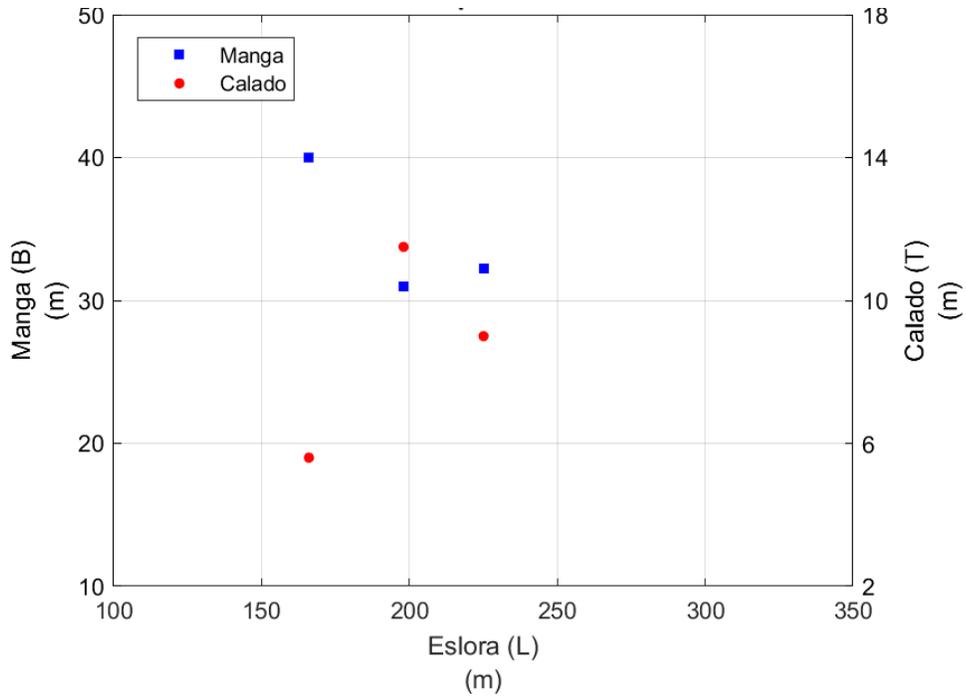
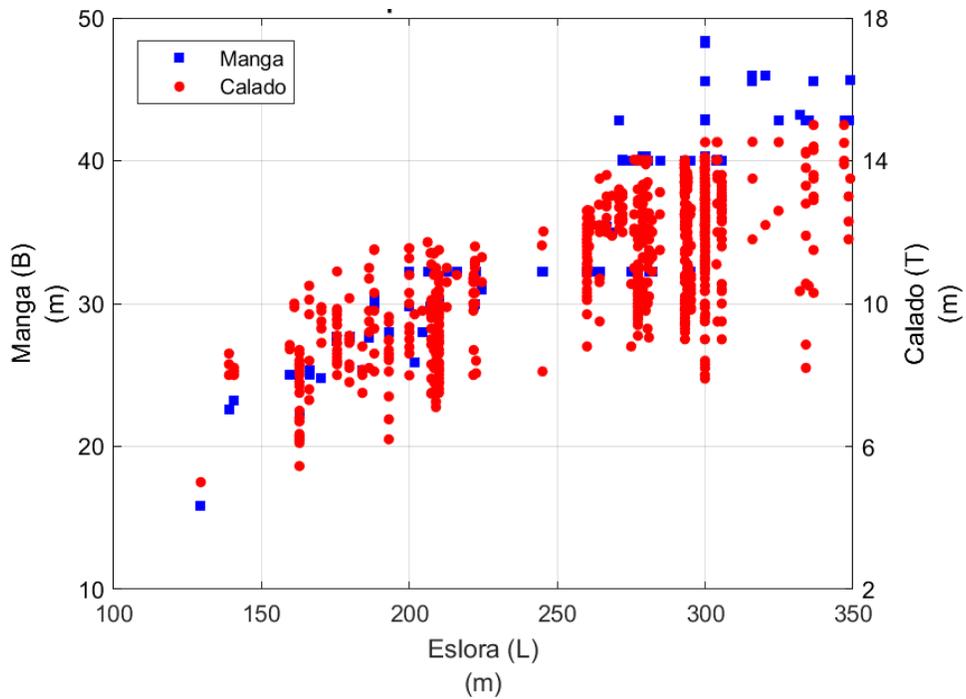


Figura 2.36 Número de arribos vs tipo de barcos.



**Figura 2.37** Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 11 y un barco granelero.



**Figura 2.38** Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 11 y un barco portacontenedor.

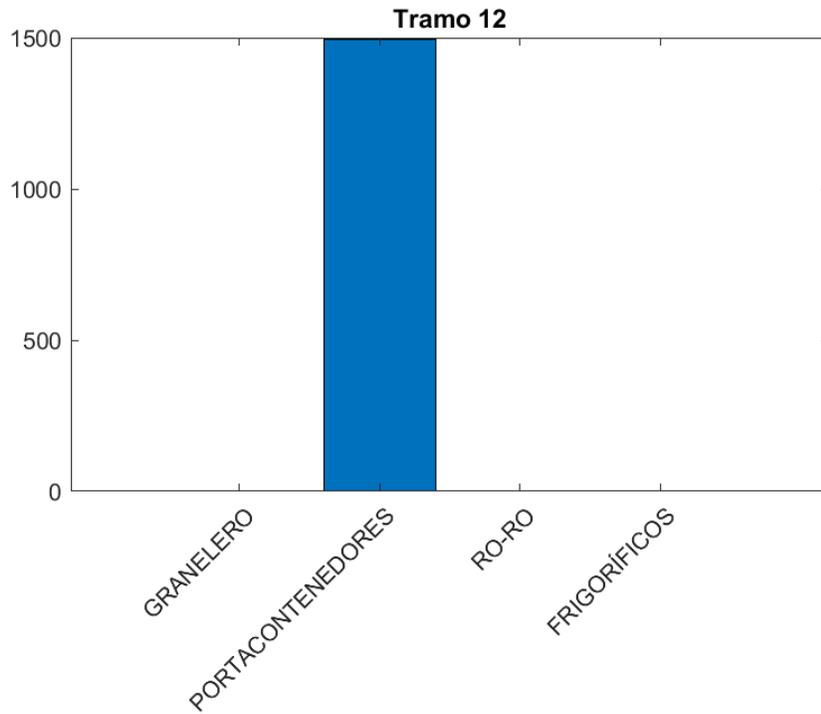


Figura 2.39 Número de arribos vs tipo de barcos.

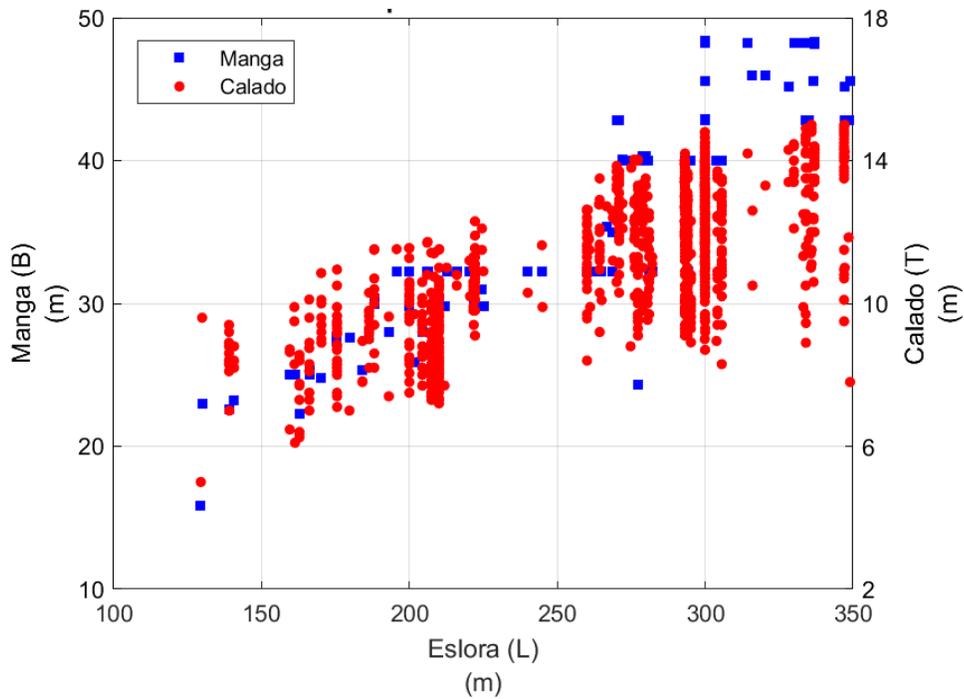


Figura 2.40 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 12 y un barco portacontenedor.

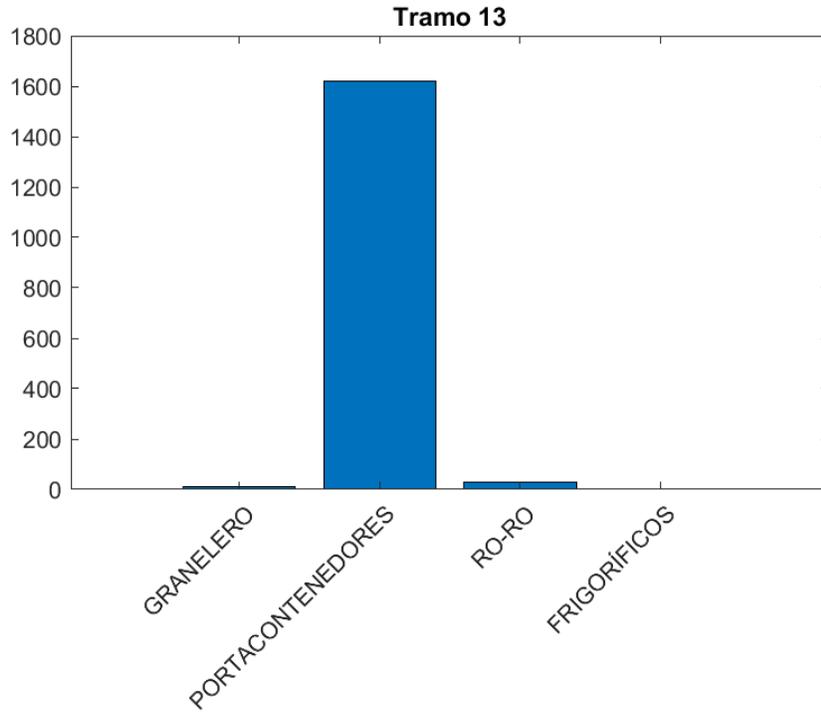


Figura 2.41 Número de arribos vs tipo de barcos.

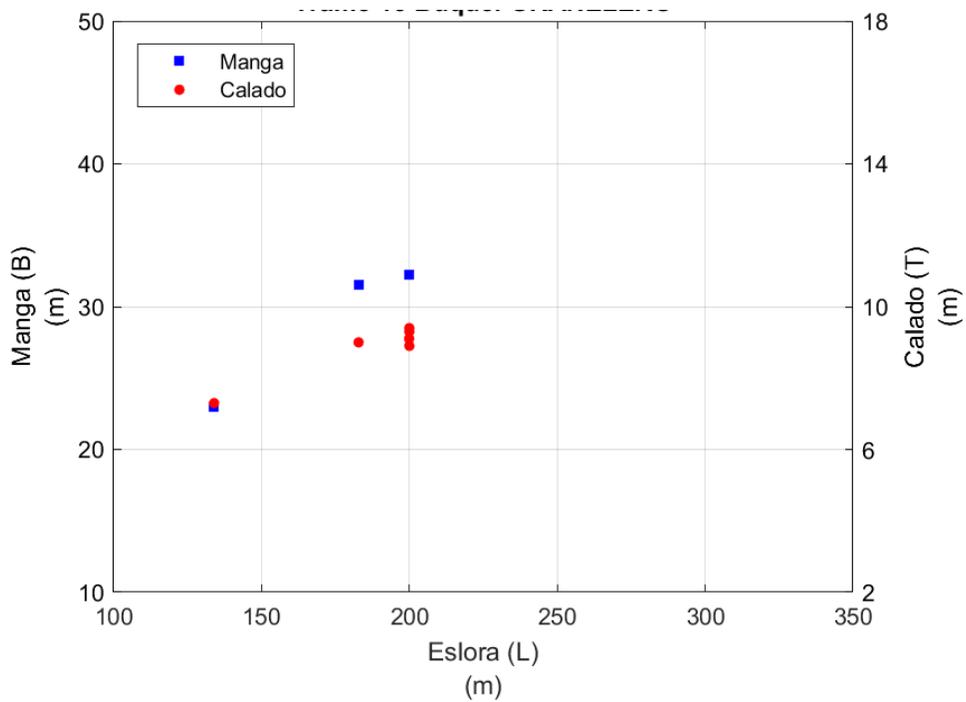


Figura 2.42 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 13 y un barco granelero.

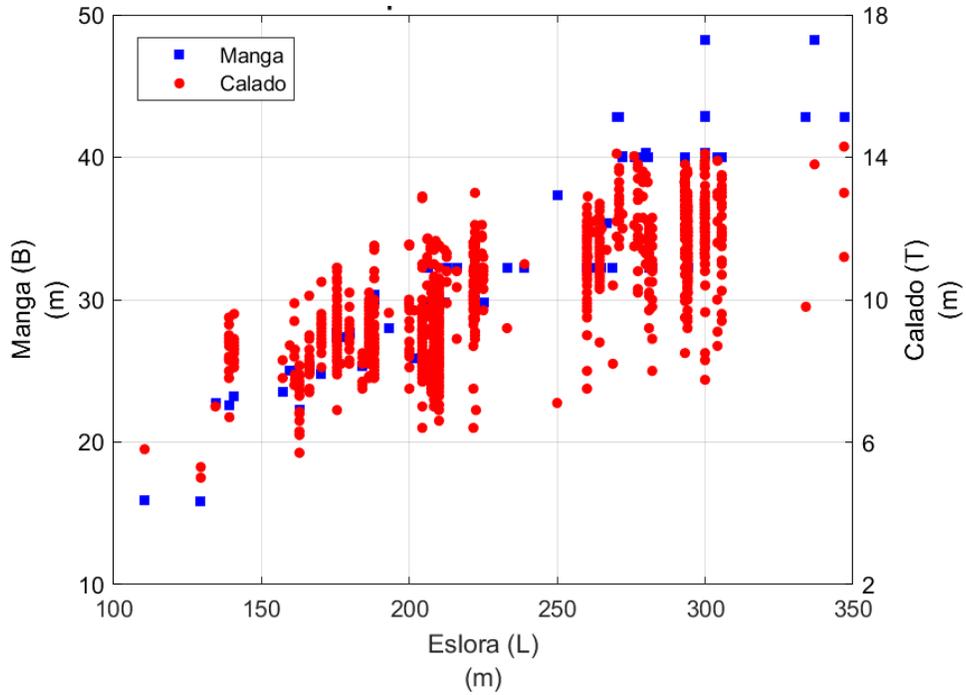


Figura 2.43 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 13 y un barco portacontenedor.

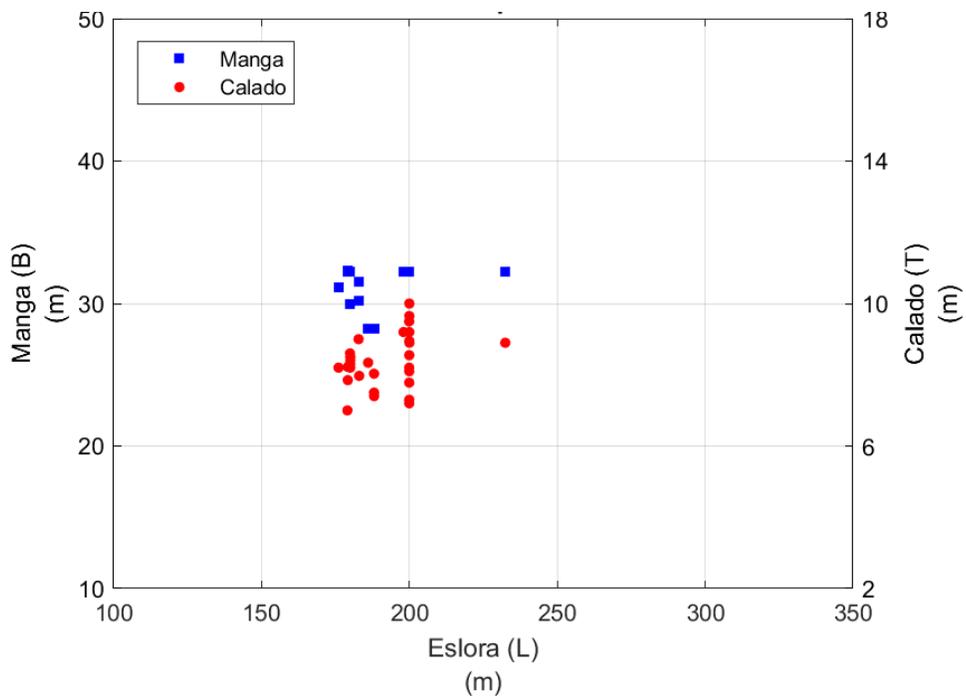


Figura 2.44 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 13 y un barco Ro-Ro.

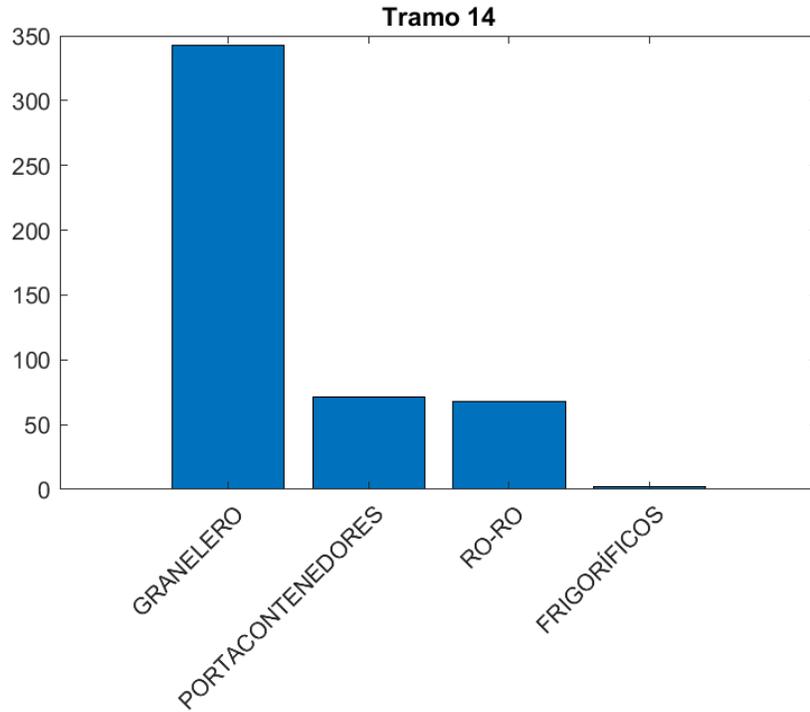


Figura 2.45 Número de arribos vs tipo de barcos.

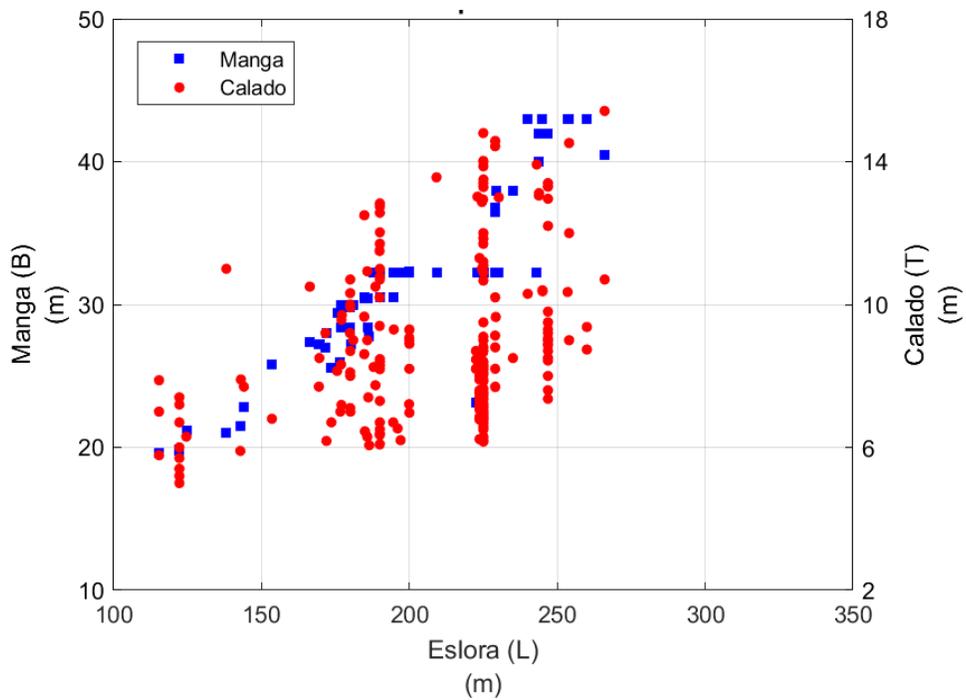


Figura 2.46 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 14 y barco granelero.

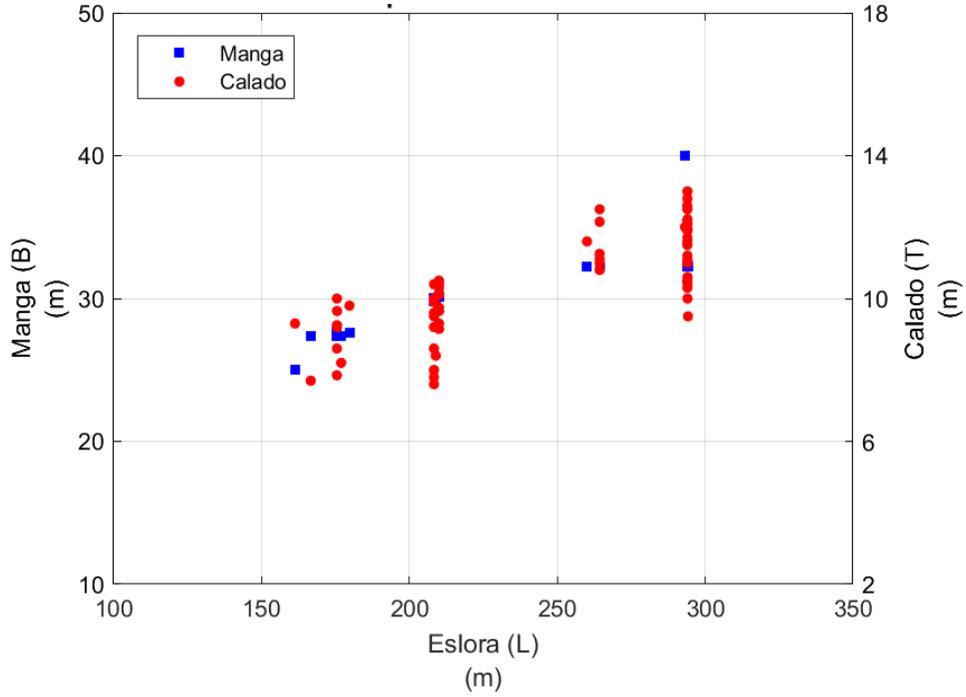


Figura 2.47 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 14 y un barco portacontenedor.

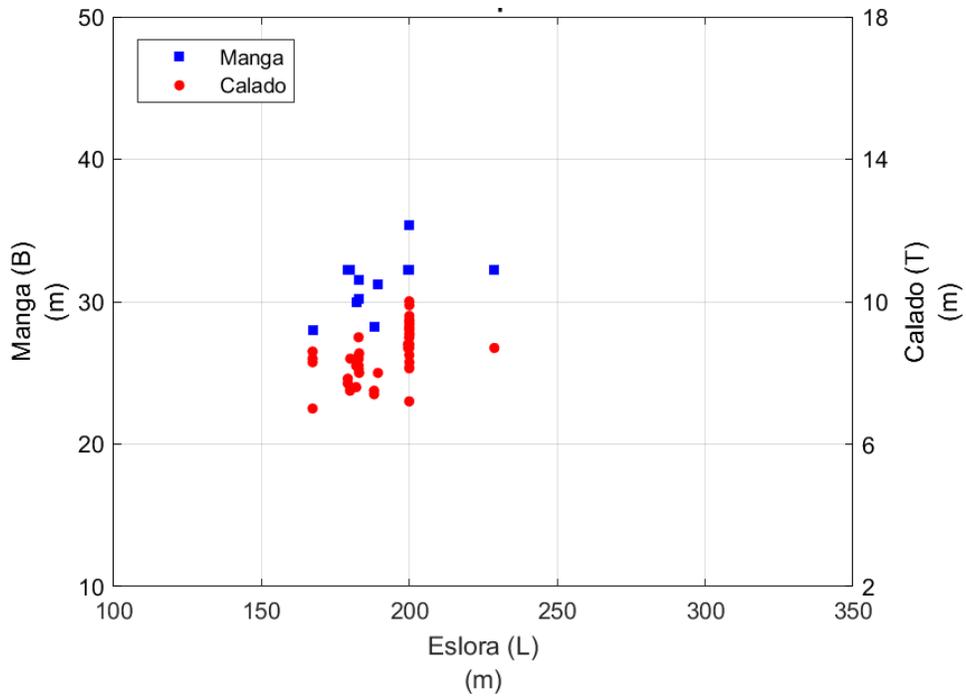


Figura 2.48 Relación entre la manga y el calado con respecto a la eslora para el tramo 14 y un barco Ro-Ro.

## 2.2 Definición y caracterización de los modelos de barcos

Para el estudio se utilizó una embarcación que cumpla con las características de los barcos con mayor arribo en las zonas de atraque de las bandas A, B y C. Para ello se seleccionó los barcos que se utilizaron en las simulaciones, dicha selección se tomó de las gráficas 2.3 a 2.48, en las cuales se observa que arriban barcos portacontenedores, graneleros y de vehículos (Ro-Ro), y la cual se describe en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Modelos seleccionados para la simulación de los movimientos de los barcos en las bandas A, B y C**

	Tramo	Granelero	Portacontenedores	Ro-Ro
<b>BANDA A</b>	2	BULKO06L	CNTNR28L	CARCO06L
	3	BULKO06L	CNTNR31L	CARCO06L
<b>BANDA B</b>	4	BULKO06L	CNTNR28L CNTNR31L	CARCO06L
	5	BULKO06L	CNTNR28L CNTNR31L	CARCO06L
	6	BULKO06L	CNTNR28L CNTNR31L	CARCO06L
<b>BANDA C</b>	7	BULKO06L	CNTNR28L CNTNR31L	CARCO06L
	8	BULKO06L	CNTNR20L	CARCO06L
	9	BULKO06L	No aplica	No aplica
	10	BULKO06L	CNTNR28L CNTNR31L	No aplica
	11	BULKO06L	CNTNR28L CNTNR31L	No aplica
	12	No aplica	CNTNR28L CNTNR31L	No aplica
	13	BULKO06L	CNTNR28L	No aplica
14	BULKO06L	CNTNR31L	CARCO06L	

Con las condiciones antes mencionadas, se realizó una descripción de las características de cada uno de los barcos que se analizaron, las cuales se presentan a continuación.

1.- El modelo BULK006L es un barco granelero M/S Magnitogorsk, en condición a plena carga, cuenta con un motor principal diésel de 9180 KW de potencia a 120 rpm directamente acoplado a la hélice de paso fijo con dirección de giro en sentido horario, alcanza una velocidad avante de 16.0 nudos y 5.8 nudos en marcha atrás. El barco es dirigido por un timón con ángulo máximo de 35 grados. Sus dimensiones principales son 215.4 m de eslora, 31.8 m de manga, 11.5 m y 11.5 m de calado en proa y popa, respectivamente. En esta condición de carga, su desplazamiento es de 60920 toneladas.



**Figura 2.49** Modelo de barco tomada de la base de datos del simulador (BULK006L)

2.- El modelo CNTNR28L es un barco portacontenedores Sovereign Mrsk, en condición a plena carga, cuenta con un motor principal diésel de 54496 KW de potencia a 94 rpm directamente acoplado a la hélice de paso fijo con dirección de giro en sentido horario, alcanza una velocidad avante de 22.8 nudos y 6.3 nudos en marcha atrás. El buque es dirigido por un timón con ángulo máximo de 35 grados, 1 bow thruster de 2000 KW y 2 stern thruster de 1600 KW. Sus dimensiones principales son 331.5 m de eslora, 42.8 m de manga, 14.5 m y 14.5 m de calado en proa y popa, respectivamente. En esta condición de carga, su desplazamiento es de 146400 toneladas.



**Figura 2.50** Modelo de barco tomada de la base de datos del simulador (CNTNR28L)

3.- El modelo CNTNR31L es un barco portacontenedores KMSS Dainty, en condición a plena carga, cuenta con un motor principal diésel de 46795 KW de potencia a 102 rpm directamente acoplado a la hélice de paso fijo con dirección de giro en sentido horario, alcanza una velocidad avante de 25 nudos y 7.2 nudos en marcha atrás. El buque es dirigido por un timón con ángulo máximo de 35 grados, 1 bow thruster de 2000 KW. Sus dimensiones principales son 294.1 m de eslora, 32.2 m de manga, 12.6 m y 12.6 m de calado en proa y popa, respectivamente. En esta condición de carga, su desplazamiento es de 76540 toneladas.



**Figura 2.51 Modelo de barco tomada de la base de datos del simulador (CNTNR31L)**

3.- El modelo CARCO06L es un barco Ro-Ro Continental Highway, en condición a plena carga, cuenta con 1 motor diésel de 13939 KW de potencia a 99 rpm directamente acoplado a una hélice de paso fijo con dirección de giro en sentido horario, alcanza una velocidad avante de 20.5 nudos y 12.2 nudos en marcha atrás. El buque es dirigido por 1 timón con ángulo máximo de 35 grados, 1 bow thruster de 1325 KW. Sus dimensiones principales son 199.9 m de eslora, 32.2 m de manga, 9.4 m y 9.9 m de calado en proa y popa, respectivamente. En esta condición de carga, su desplazamiento es de 32480 toneladas.



**Figura 2.52 Modelo de barco tomada de la base de datos del simulador (CARCO06L).**



### **3. Modelo matemático e hidrodinámico del simulador**

---

Los modelos numéricos de simuladores de embarcaciones en tiempo real, han sido actualmente una herramienta para la definición de las áreas de agua que se encuentran en un puerto y de las características de las condiciones de las amarras que se presenta en la simulación de un buque atracado en un puerto.

#### **3.1 Características del simulador en tiempo real**

Los simuladores de maniobras de embarcaciones, se puede definir en dos áreas, la primera de ellas está destinada al puente principal, y la segunda está destinada a estaciones de trabajo para el desarrollo de las bases de datos y modelos hidrodinámicos de barcos.

El simulador está formado por los siguientes componentes:

- Estructura del puente de mando
- Reproducción de los equipos existentes en un puente de mando dentro de un buque.
- Equipos de gobierno y control: timón, telégrafo de órdenes a la máquina, control de las hélices transversales de maniobra y control de anclas.
- Equipos de ayuda para la navegación: GPS LORAN C, radar ARPA, VHF, sonda, equipos de comunicación interna y señales fónicas.
- Imagen de radar sintética generada por el ordenador con todas las prestaciones de un radar ARPA
- Imagen con prestaciones similares a las de una carta de navegación electrónica ECDIS

Vista exterior formada por:

- Pantallas generando una visión de 240° de amplitud horizontal y 40° de amplitud vertical.
- Tarjetas gráficas encargadas de la generación de imagen visual que se transmite a las pantallas.

Adicionalmente, también cuenta con un Puesto de control de las simulaciones desde el cual se configuran las condiciones meteorológicas (viento, oleaje, corrientes), los parámetros de visibilidad (lluvia, niebla, noche, día crepúsculo, anochecer) o se provocan situaciones inesperadas, tales como fallas en la maquinaria o en el timón de manera interactiva con la simulación en curso.

## **3.2 Modelo matemático e hidrodinámico de un simulador de embarcaciones en tiempo real**

El modelo matemático de la dinámica del barco, es un sistema complejo que modela el movimiento del barco y la dinámica de diferentes subsistemas en el barco, así como otros fenómenos físicos requeridos para ser simulado junto con la dinámica del barco.

El modelo está basado en el sistema de ecuaciones diferenciales. Para los movimientos del barco, las ecuaciones reflejan la segunda ley de Newton. Para otros objetos, las ecuaciones pueden representar algunas otras relaciones. Las relaciones pueden ser de naturaleza diferencial y algebraica.

La parte principal del modelo es un sistema de ecuaciones diferenciales del movimiento del barco. la estructura general de la misma se muestra en el diagrama de bloques (ver la figura 3.1).

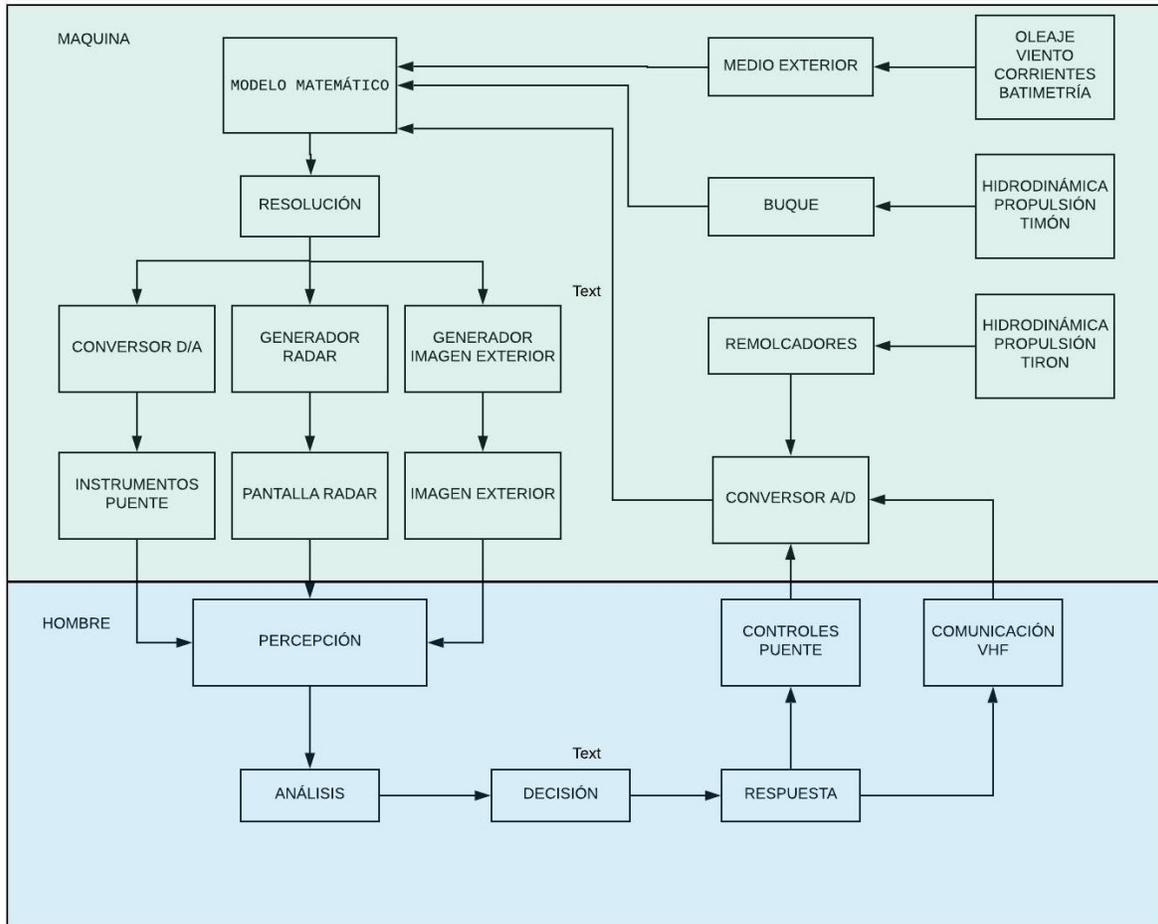


Figura 3.1 diagrama de flujo de un simulador de embarcaciones en tiempo real

### Sistemas de referencia

El modelo matemático considera varios sistemas de referencia que se describen a continuación:

#### Sistema de coordenadas geográficas (Geographic Coordinate System (G))

El sistema de coordenadas geográficas define las posiciones por la latitud ( $\mu$ ) y la longitud ( $\lambda$ ) geográfica (medidos en radianes) y la altitud sobre el nivel cero de referencia ( $\zeta$ ) (medido en metros). La latitud y la longitud pueden referirse a cualquier *datum*; normalmente el modelo usa el sistema WGS84

### **Eje terrestre (Earth Axis (EA))**

El sistema es fijo a la tierra  $0\xi\eta\zeta$ . Usualmente eje- $\xi$  es el norte, eje- $\eta$  es el este y el eje- $\zeta$  es el sur. El origen puede localizarse en cualquier parte de la tierra. Tenga en cuenta que EA no toma en cuenta la curvatura de la tierra y solo se puede usar en pequeñas áreas geográficas.

### **Eje general del cuerpo (General Body Axes (GBA))**

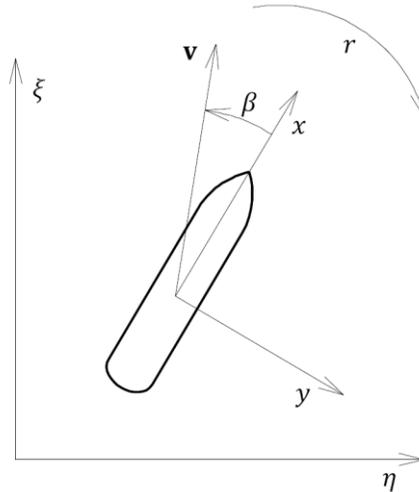
Este sistema es fijo al buque, tiene el eje X a lo largo del barco en dirección delantera, el eje Y a estribor y el eje Z hacia abajo del buque. El origen de este sistema de referencia puede ubicarse en el centro geométrico del barco o en el centro de gravedad de barco.

### **Eje horizontal del cuerpo (Horizontal Body Axis (HBA))**

Este sistema de coordenadas utiliza el sistema EA como punto de partida, con origen en la proyección del punto cero del buque en el plano horizontal y sus dos primeros ejes girados de tal manera que su primer eje coincide con el eje x-GBA proyectado en el plano horizontal.

### **Eje del plano de agua (Water Axis (WA))**

El sistema de coordenadas  $0x_1y_1z_1$  tiene origen en el centro de la superficie mojada del buque proyectada sobre el plano de agua equivalente. Su plano horizontal coincide con el plano de agua equivalente con el eje- $x_1$  en la dirección de proyección del eje x-GBA en el plano de agua equivalente.



**Figura 3.2** sistema de referencia, donde se muestra el eje terrestre (EA), el eje general del cuerpo (GBA), el vector de velocidad del buque  $v$ , la velocidad de giro  $r$  y el ángulo de deriva  $\beta$

Las coordenadas angulares son introducidas de la siguiente manera:

$\phi$  balanceo, positivo cuando baja estribor

$\theta$  cabeceo, positivo cuando la proa sube

$\psi$  guiñada, positivo cuando gira hacia estribor

### Plano de agua equivalente (Equivalent Water plane EWP)

Con el fin de hacer frente a los movimientos del buque en condiciones de marea y olas grandes, se introduce un plano de agua equivalente (EWP).

considere la superficie del agua excitada por la altura de la ola  $\zeta_w = \zeta_w(\mu, \lambda)$ . El plano de agua equivalente  $\zeta_{EWP} = \zeta_{EWP}(\mu, \lambda)$  se define de manera que:

$$\int_A (\zeta_w - \zeta_{EWP})^2 dA \rightarrow \min$$

Donde  $A$  es la proyección del casco del buque en la superficie del agua no excitada. El procedimiento numérico para la determinación del EWP se basa en el método de mínimos cuadrados.

## Transformación de coordenadas

Un punto definido por GBA y sus coordenadas  $\mathbf{x}^{(GBA)}$  se puede transformar al sistema de coordenadas EA  $\mathbf{x}^{(EA)}$  y viceversa mediante la matriz de transformación  $\mathbf{T}$

$$\mathbf{x}^{(EA)} = \mathbf{x}_0^{(EA)} + \mathbf{T}\mathbf{x}^{(GBA)}$$

$$\mathbf{x}^{(GBA)} = \mathbf{T}^{-1}(\mathbf{x}^{(EA)} - \mathbf{x}_0^{(EA)})$$

Aquí  $\mathbf{x}^{(EA)}$  es la posición de EA del origen de GBA. La matriz de transformación  $\mathbf{T}$  se puede definir como un producto de las matrices de rotación  $\mathbf{T}_\psi$ ,  $\mathbf{T}_\theta$  y  $\mathbf{T}_\phi$  para el avance  $\psi$ , el cabeceo  $\theta$  y el balanceo  $\phi$ , respectivamente.

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_\psi \mathbf{T}_\theta \mathbf{T}_\phi$$

Donde:

$$\mathbf{T}_\psi = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{T}_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}, \mathbf{T}_\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}$$

La matriz de rotación resultante es:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \theta \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & 0 & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix}$$

La matriz para la transformación de coordenadas inversa  $\mathbf{T}^{-1}$  es idéntica a la matriz transpuesta  $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}^T = \mathbf{T}_\psi^T \mathbf{T}_\theta^T \mathbf{T}_\phi^T$

## Velocidad y aceleración sobre un punto arbitrario

Suponga un punto arbitrario en el cuerpo del buque con las coordenadas GBA  $\mathbf{x}^{(GBA)}$ . La velocidad lineal  $\mathbf{v}^{(GBA)}$  y la aceleración  $\mathbf{a}^{(GBA)}$  de este punto GBA puede expresarse como

$$\mathbf{x}^{(GBA)} = \mathbf{v}_0^{(GBA)} + \Omega \mathbf{x}^{(GBA)}$$

$$\mathbf{a}^{(\text{GBA})} = \mathbf{a}_0^{(\text{GBA})} + (\Omega\Omega + \dot{\Omega})\mathbf{x}^{(\text{GBA})}$$

En estas ecuaciones las matrices  $\Omega$  y  $\dot{\Omega}$  son definidas como:

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

$$\dot{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 & -\dot{r} & \dot{q} \\ \dot{r} & 0 & -\dot{p} \\ -\dot{q} & \dot{p} & 0 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Los vectores  $\mathbf{v}_0^{(\text{GBA})}$  y  $\mathbf{a}_0^{(\text{GBA})}$  representan los componentes GBA de la velocidad y la aceleración del origen del buque.

### Relaciones cinemáticas

Las relaciones entre derivados de coordenadas angulares  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\psi$  por un lado y los componentes de velocidades angulares  $p$ ,  $q$  y  $r$  por otro don dados por las ecuaciones siguientes:

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & \\ 0 & \sin \phi / \cos \phi & \cos \phi / \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}$$

O en forma inversa

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix}$$

Tenga en cuenta que las relaciones cinemáticas tienen singularidad para todos los  $\theta = \pi \pm 2\pi n$ , donde  $n$  es entero

### Grados de libertad

Las posiciones lineales, angulares y la velocidad conforman un vector de estado para las ecuaciones diferenciales de movimiento del buque dependiendo del número de grados de libertad en el modelo.

**Tabla 3.1 Grados de libertad en función del sistema de referencia**

Variable			Sistema de Referencia	Grados de libertad		
				3	4	6
Posición	Lineal	Latitud $\mu$	G	●	●	●
		Longitud $\lambda$	G	●	●	●
		Altitud $\zeta$	G	○	○	●
	Angular	Balanceo $\phi$	G	○	●	●
		Cabeceo $\theta$	G	○	○	●
		Guiñada $\psi$	G	●	●	●
Velocidad	Lineal	Longitudinal $u$	GBA	●	●	●
		Transversal $v$	GBA	●	●	●
		Vertical $w$	GBA	○	○	●
	Angular	Velocidad Angular $p$	GBA	○	●	●
		Velocidad Angular $q$	GBA	○	○	●
		Velocidad Angular $r$	GBA	●	●	●

### Ecuaciones de movimiento del buque

En el caso de un cuerpo rígido que se mueve en un espacio tridimensional, las ecuaciones de los movimientos se pueden escribir en forma vectorial:

$$m\dot{V} + m\dot{\omega} * X_G + m\omega * V + m\omega * \omega * X_G = F$$

$$I\dot{\omega} - m\dot{V} * X_G + \omega * I\omega - m(\omega * V) * X_G = M$$

Donde:

$m$  = Es la masa del cuerpo

$X_G$  = Es la posición del centro de gravedad del cuerpo ( $x_G, y_G, z_G$ )

$V$  = Es el vector de velocidad lineal ( $u, v, w$ )

$\omega$  = Es el vector de velocidad angular ( $p, q, r$ )

$F$  = es el vector resultante de todas las fuerzas externas (X, Y, X)

$M$  = Es el vector resultante de todos los momentos externos (K, M, N)

$I$  = Es la matriz que representa el tensor de inercia del cuerpo

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{pmatrix}$$

Para la implementación de las ecuaciones de los movimientos es conveniente utilizarlas en el sistema de coordenadas del eje general del cuerpo (GBA, por sus siglas en inglés) con origen en el centro de gravedad del buque, en donde  $x_G = y_G = z_G = 0$ , en el sistema de coordenadas, las ecuaciones se expanden a:

$$m(\dot{u} - vr + wq) = X$$

$$m(\dot{v} - wp + ur) = Y$$

$$m(\dot{w} - uq + vp) = Z$$

$$I_{xx}\dot{p} - (I_{zz} - I_{yy})qr + I_{xz}(\dot{r} - qp) + I_{yz}(r^2 + q^2) + I_{xy}(pr + \dot{q}) = K$$

$$I_{yy}\dot{q} - (I_{xx} - I_{zz})rp - I_{xy}(\dot{p} - rq) + I_{xz}(p^2 + r^2) + I_{yz}(qp + \dot{r}) = M$$

$$I_{zz}\dot{r} - (I_{yy} - I_{xx})pq - I_{yz}(\dot{q} - pr) + I_{xy}(q^2 + p^2) + I_{xz}(rq + \dot{p}) = N$$

Si se hace la suposición de que  $I_{xy} = I_{yz} = I_{xz} = 0$ . Los componenetes diagonales del tensor de inercia se define tradicionalmente a través del radio de giro relativo.

$$\bar{r}_{xx}^2 = \frac{I_{xx}}{mB^2}$$

$$\bar{r}_{yy}^2 = \frac{I_{yy}}{mL^2}$$

$$\bar{r}_{zz}^2 = \frac{I_{zz}}{mL^2}$$

La parte izquierda de la ecuacion representa las fuerzas y momentos de aceleracion e inercia del buque, mientras que la parte derecha es la suma de todas las fuerzas y momentos externos.

$$X = \sum_i X_i$$

$$Y = \sum_i Y_i$$
$$Z = \sum_i Z_i$$
$$K = \sum_i K_i$$
$$M = \sum_i M_i$$
$$N = \sum_i N_i$$

El índice  $i$  representa cada una de las fuerzas y los momentos generados por las diferentes naturalezas físicas, como fuerzas hidrodinámicas, empuje de la hélice, fuerzas de las líneas de amarre, etc.

## **4. Simulaciones y resultados de las maniobras**

---

Tomando en cuenta las condiciones oceanográficas y meteorológicas, las características de los barcos atracados en las bandas A, B y C en el puerto de Manzanillo, se realizaron las simulaciones con el simulador de embarcaciones en tiempo real y así obtener los movimientos de los barcos y las tensiones que se generan en cada una de las amarras.

### **4.1 Condiciones iniciales y de frontera**

Para conocer el comportamiento de la capacidad de las tensiones de las amarras y del balanceo que presenta el buque con condiciones de viento y de marea, se realizaron varias simulaciones en las diferentes bandas que existen en dicho puerto, para este análisis se definió simular en las bandas A y C, y la banda C, se dividió en tres zonas, las cuales, para poderlos identificar en el proyecto, se nombraron como C1, C2, y C3, dicha distribución se muestra en la figura 4.1.



Figura 4.1 Ubicación del análisis de maniobras en las diferentes bandas.

### 4.1.1 Barcos simulados

Otra de las condiciones que se requiere para dichas simulaciones son los barcos que se deben de analizar en las diferentes bandas. Los barcos que se utilizaron fueron los que se muestran en la figura 4.2:

	
Bulk Carrier (BULK06L)	Container (CNTNR28L)
	
Car Carrier (CARCO06L)	Container (CNTNR31L)

**Figura 4.2 Barcos que se utilizados en las simulaciones.**

### 4.1.2 Condiciones de viento

Otra de las componentes importante en las simulaciones es el viento, dicha información se tomó de la Estación Meteorológica que se encuentra localizada sobre el edificio de la capitanía de puerto al canal de acceso al recinto, con los datos obtenidos se definió utilizar como condiciones de frontera el viento reinante y el dominante, se observó que dichos valores provienen de la dirección S 67.5° O (viento reinante) y de la dirección N 45° O (viento dominante), respectivamente.

Tomando en cuenta la información del viento, se definió las condiciones iniciales o de frontera que se utilizaran en las simulaciones, dichas condiciones se muestran en las tablas 4.1 y 4.2.

**Tabla 4.1 Condiciones de frontera tomando en cuenta el viento reinante**

	No. de simulación	Modelo	Velocidad (Kn)	Dirección
Banda A	1	BULK06L	10.4	S 67.5° O
	2	CNTNR28L	10.4	S 67.5° O
	3	CARCO06L	10.4	S 67.5° O
	4	CNTNR31L	10.4	S 67.5° O
Banda B	5	BULK06L	10.4	S 67.5° O
	6	CNTNR28L	10.4	S 67.5° O
	7	CARCO06L	10.4	S 67.5° O
Banda C1	8	BULK06L	10.4	S 67.5° O
	9	CNTNR28L	10.4	S 67.5° O
	10	CARCO06L	10.4	S 67.5° O
	11	CNTNR31L	10.4	S 67.5° O
Banda C2	12	BULK06L	10.4	S 67.5° O
	13	CNTNR28L	10.4	S 67.5° O
	14	CARCO06L	10.4	S 67.5° O
	15	CNTNR31L	10.4	S 67.5° O
Banda C3	16	BULK06L	10.4	S 67.5° O
	17	CNTNR28L	10.4	S 67.5° O
	18	CARCO06L	10.4	S 67.5° O
	19	CNTNR31L	10.4	S 67.5° O

**Tabla 4.2 Condiciones de frontera tomando en cuenta el viento dominante**

	No. de simulación	Modelo	Velocidad (Kn)	Dirección
Banda A	1	BULK06L	32.1	N 45° O
	2	CNTNR28L	32.1	N 45° O
	3	CARCO06L	32.1	N 45° O
	4	CNTNR31L	32.1	N 45° O
Banda B	5	BULK06L	32.1	N 45° O
	6	CNTNR28L	32.1	N 45° O
	7	CARCO06L	32.1	N 45° O
Banda C1	8	BULK06L	32.1	N 45° O
	9	CNTNR28L	32.1	N 45° O
	10	CARCO06L	32.1	N 45° O

	11	CNTNR31L	32.1	N 45° O
Banda C2	12	BULK06L	32.1	N 45° O
	13	CNTNR28L	32.1	N 45° O
	14	CARCO06L	32.1	N 45° O
	15	CNTNR31L	32.1	N 45° O
Banda C3	16	BULK06L	32.1	N 45° O
	17	CNTNR28L	32.1	N 45° O
	18	CARCO06L	32.1	N 45° O
	19	CNTNR31L	32.1	N 45° O

### 4.1.3 Condiciones por efecto de un tsunami

Otro análisis que se realizó para conocer las tensiones de las amarras y del balanceo del barco, es la propagación de las corrientes producidas por un tsunami que se presentó en 1995. Para determinar dichas corrientes, se utilizó un modelo numérico, el cual se describe a continuación.

#### Modelo numérico

Para determinar las características de las corrientes se utilizó un modelo hidrodinámico, este sistema de modelación ha sido aplicado en los océanos, costas, etc.

El modelo numérico que se utilizó para determinar las corrientes, fue el modelo de flujo del MIKE21 FM. Las áreas de aplicación son en zonas marinas donde generalmente los fenómenos de flujo y transporte son importantes. El modelo hidrodinámico está basado en la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad. La discretización espacial se resuelve utilizando el método de volumen infinito de celda centrada.

La ecuación de continuidad se expresa como sigue:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

La ecuación de momentum en la dirección x, se expresa como sigue:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} -$$

$$\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial p}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

La ecuación de momentum en la dirección y, se expresa como sigue:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} -$$

$$\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial p}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

Donde:

x,y coordenadas cartesianas.

t tiempo.

$\eta$  nivel de la superficie del agua.

$\rho$  densidad del agua.

$\rho_0$  densidad del agua de referencia.

h profundidad.

f parámetro de Coriolis.

S magnitud de la descarga.

$S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yx}$   $S_{yy}$  son las componentes de los esfuerzos radiales.

g aceleración de la gravedad.

$P_a$  presión atmosférica.

$\nu$  coeficiente de viscosidad.

La exactitud y el tiempo de simulación se controla con especificar el orden del esquema numérico. El tiempo de integración, en la ecuación de aguas someras y del transporte, se mejoró utilizando un esquema explícito, y debido a la restricción de estabilidad utilizando un esquema explícito el intervalo del paso de tiempo debe ser seleccionado y el número CFL (Courant-Friedrich-Lévy) debe ser menor de uno. El valor de CFL, se calcula de la siguiente manera:

$$CFL_{HD} = \left(\sqrt{gh} + |u|\right) \frac{\Delta t}{\Delta x} + \left(\sqrt{gh} + |v|\right) \frac{\Delta t}{\Delta y}$$

Donde:

$h$  profundidad del agua.

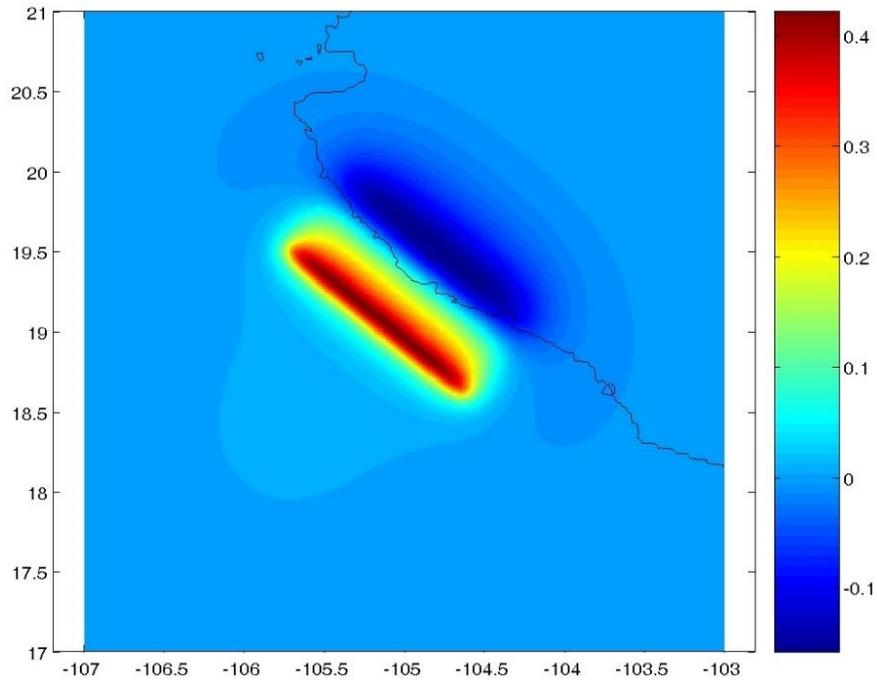
$u, v$  componentes de velocidad en la dirección  $x$  y  $y$ .

$g$  aceleración de la gravedad.

$\Delta x$  y  $\Delta y$  distancia en la dirección  $x$  y  $y$ .

$\Delta t$  intervalo del paso de tiempo.

Para las condiciones iniciales de los efectos de un Tsunami, se requiere de conocer la superficie de elevación que lo produce, para este caso se analizó el Tsunami que se presentó en Manzanillo en 1995, dicha superficie se obtuvo de un modelo numérico, su configuración se presenta en la figura 4.3.



**Figura 4.3** Condiciones iniciales para modelar el efecto de Tsunami de 1995.

Tomando en cuenta las condiciones iniciales (ver figura 4.3), se utilizó un modelo numérico hidrodinámico, para definir el efecto que se presenta en el puerto de Manzanillo. Los resultados de estas modelaciones se presentan en las figuras 4.4 y 4.5.

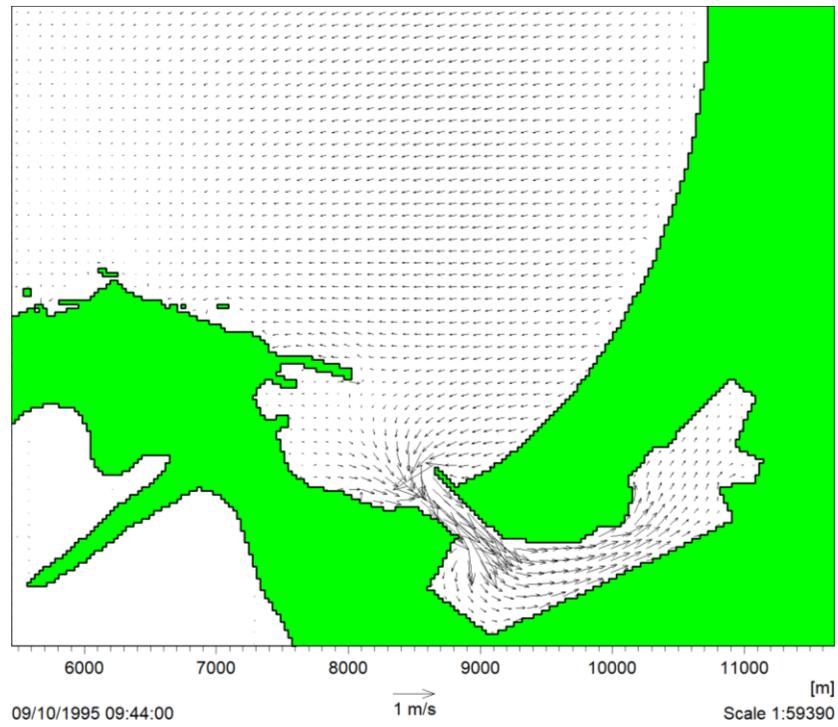


Figura 4.4 Corriente entrante generada por el Tsunami al puerto de Manzanillo

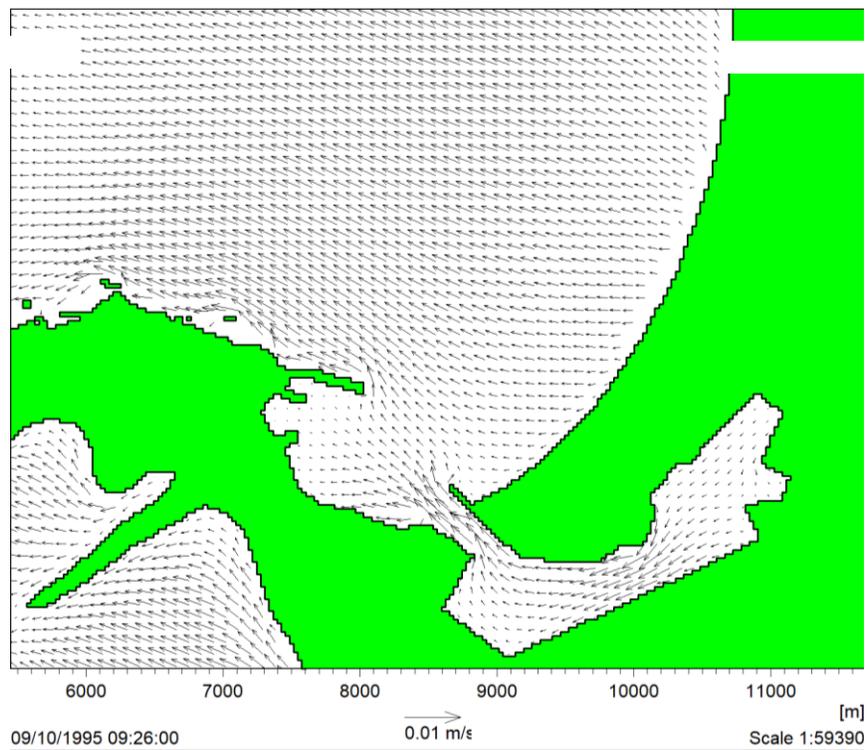


Figura 4.5 corriente saliente generada por el Tsunami al puerto de Manzanillo

Tomando en cuenta los resultados generados por el modelo numérico con el efecto de un Tsunami, se definió las condiciones iniciales para realizar las simulaciones de maniobrabilidad, para ello se definió una distribución de la maniobrabilidad de los barcos (ver tabla 4.3).

**Tabla 4.3 Distribución de la simulación de los barcos para los efectos de un Tsunami.**

	No.	Modelo
Banda A	1	BULK06L
	2	CNTNR28L
	3	CARCO06L
	4	CNTNR31L
Banda B	5	BULK06L
	6	CNTNR28L
	7	CARCO06L
Banda C1	8	BULK06L
	9	CNTNR28L
	10	CARCO06L
	11	CNTNR31L
Banda C2	12	BULK06L
	13	CNTNR28L
	14	CARCO06L
	15	CNTNR31L
Banda C3	16	BULK06L
	17	CNTNR28L
	18	CARCO06L
	19	CNTNR31L

#### **4.1.4 Condiciones de marea**

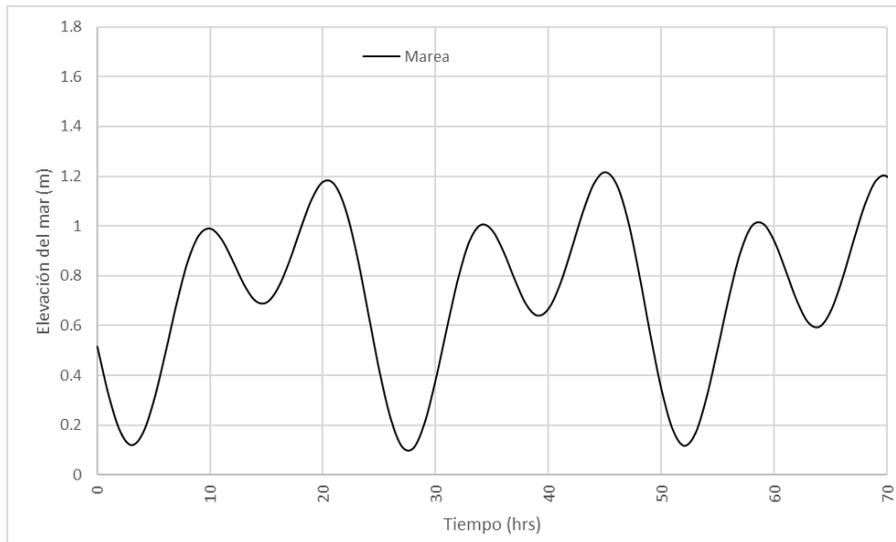
El ascenso y descenso del nivel del mar genera movimientos notables en las masas líquidas, sobre todo en zonas costeras en donde las comunicaciones con el mar están relativamente restringidas (estuarios, bahías, entradas a puertos, desembocaduras, etc.) y estas generan las llamadas corrientes de marea.

Las características de las corrientes de marea cambian de un lugar a otro, dependiendo en primer término de la marea y en función también, de la profundidad. Los efectos producidos por las corrientes de marea interesan por lo general, en las zonas inmediatas al litoral.

Por el contrario, en las proximidades a las costas y especialmente en las zonas estrechas, como las antes mencionadas, las velocidades pueden llegar a ser considerables dando lugar a problemas de diversa índole, tales como, el transporte de sedimentos en los accesos de los puertos, y el transporte de contaminantes, etc.

Otra condición importante para analizar son las corrientes producidas por las mareas, para ello se realizó previamente simulaciones numéricas de corrientes de marea, tomando en cuenta la información de marea definida en el subcapítulo 1.3, se utilizó la marea máxima como condición de frontera, dicha marea se muestra en la figura 4.6.

Tomando la información de la elevación del mar de la figura 4.6, se realizó la modelación numérica, utilizando el modelo hidrodinámico descrito anteriormente. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 4.7 y 4.8.



**Figura 4.6** Condición de frontera de la elevación del mar para el puerto de Manzanillo



**Figura 4.7** Corriente entrante producida por la marea al puerto de Manzanillo.



**Figura 4.8** Corriente saliente producida por la marea al puerto de Manzanillo.

Con los resultados antes mencionados, se utilizaron para realizar las simulaciones de maniobrabilidad, y se definió los tipos de barcos que se simularan en las diferentes bandas, dicha distribución se muestra en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4 Distribución de la simulación de los barcos para los efectos de la marea.**

	No.	Modelo
Banda A	1	BULK06L
	2	CNTNR28L
	3	CARCO06L
	4	CNTNR31L
Banda B	5	BULK06L
	6	CNTNR28L
	7	CARCO06L
Banda C1	8	BULK06L
	9	CNTNR28L
	10	CARCO06L
	11	CNTNR31L
Banda C2	12	BULK06L
	13	CNTNR28L
	14	CARCO06L
	15	CNTNR31L
Banda C3	16	BULK06L
	17	CNTNR28L
	18	CARCO06L
	19	CNTNR31L

#### 4.1.5 Condiciones de marea con sobreelevación

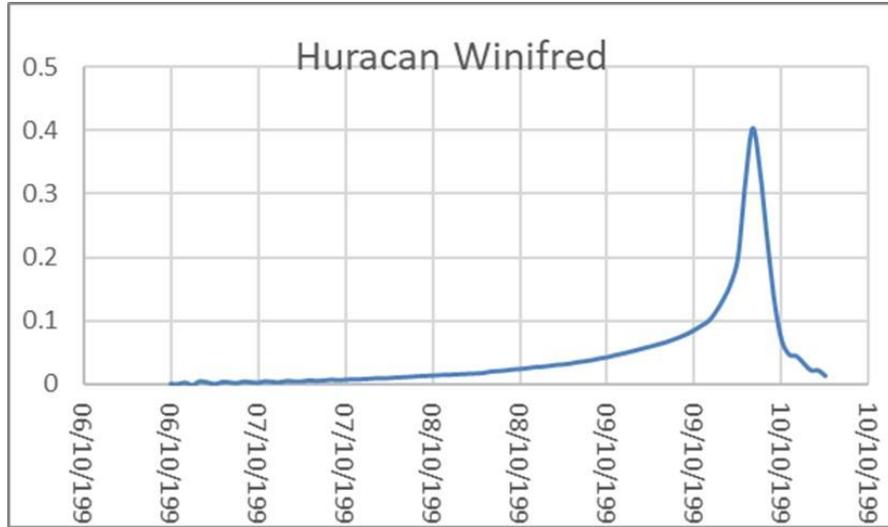
Otra condición importante que se analizó, fue la de las corrientes producidas por las mareas y alteradas por una sobreelevación, para ello se utilizó los resultados del análisis de 69 huracanes que afectaron la zona del puerto de Manzanillo, el listado de los huracanes se presenta en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5 Huracanes que afectaron la zona del puerto de Manzanillo.**

Nombre	Fecha	Año	Categoría	Nombre	Fecha	Año	Categoría
Ismael	14 - 25/ago	1989	3	Olaf	3 - 8/oct	2003	1
Iselle	20 - 30/jul	1990	3	Javier	10 - 20/sep	2004	4
Kevin	25/sep - 12/oct	1991	4	Hilary	19 - 28/ago	2005	2
Virgil	1 - 5/oct	1992	4	John	28/ago - 4/sep	2006	4
Winifred	6 - 10/oct	1992	3	Lane	13 - 17/sep	2006	3
Calvin	4 - 9/jul	1993	2	Andres	24 - 24/jun	2009	1
Hilary	17 - 27/ago	1993	3	Jimena	28/ago - 5/sep	2009	4
Jova	29/ago - 5/sep	1993	4	Rick	15 - 21/oct	2009	5
Lidia	8 - 14/sep	1993	4	Frank	21 - 29/ago	2010	1
Rosa	8 - 15/oct	1994	2	Adrian	7 - 14/jun	2011	4
Adolph	15 - 21/jun	1995	4	Beatriz	18 - 22/jun	2011	1
Flossie	7 - 14/jun	1995	1	Calvin	7 - 14/jul	2011	1
Henriette	1 - 8/sep	1995	2	Dora	18 - 26/jul	2011	4
Ismael	12 - 15/sep	1995	1	Hilary	21/sep - 3/oct	2011	4
Juliette	16 - 26/sep	1995	4	Jova	5 - 12/oct	2011	3
Alma	20 - 27/sep	1996	2	Bud	20 - 26/may	2012	3
Boris	27/jun - 1/jul	1996	1	Dalila	28/jun - 8/jul	2013	1
Douglas	29/jul - 6/ago	1996	4	Erick	4 - 9/jul	2013	1
Fausto	10 - 14/sep	1996	3	Raymond	19/oct - 1/nov	2013	3
Hernan	30/sep - 4/oct	1996	1	Cristina	9 - 19/jun	2014	4

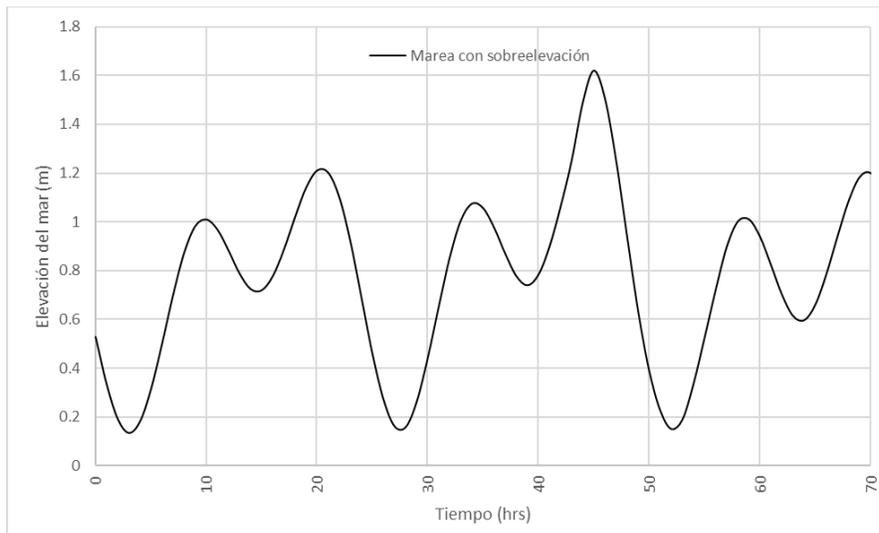
Guillermo	30/jul - 24/ago	1997	5	Odile	9 - 18/sep	2014	4
Linda	9 - 17/sep	1997	5	Polo	16 - 26/sep	2014	1
Nora	16 - 26/sep	1997	3	Blanca	31/may - 9/jun	2015	4
Pauline	5 - 10/oct	1997	4	Carlos	10 - 18/jun	2015	1
Rick	7 - 10/nov	1997	2	Dolores	11 - 22/jul	2015	4
Blas	22 - 30/jun	1998	4	Patricia	20 - 24/oct	2015	5
Lester	15 - 26/oct	1998	3	Sandra	23 - 29/nov	2015	4
Adrian	18 - 22/jun	1999	2	Newton	4 - 8/sep	2016	1
Aletta	22 - 28/may	2000	2	Dora	24/jun - 1/jul	2017	2
Carlota	18 - 25/jun	2000	4	Hilary	20/jul - 1/ago	2017	2
Adolph	25/may - 1/jun	2001	4	Bud	9 - 16/jun	2018	4
Juliette	21/sep - 3/oct	2001	4	John	5 - 13/ago	2018	2
Hernan	30/ago - 6/sep	2002	5	Willa	19 - 24/oct	2018	4
Kenna	22 - 26/oct	2002	5	Lorena	17 - 22/sep	2019	1
Marty	18 - 26/sep	2003	2				

Con los resultados analizados, se determinó que el huracán Winifred produjo la mayor sobreelevación, obteniendo una sobreelevación máxima de 0.40 m, la distribución de la sobreelevación en el tiempo se muestra en la figura 4.9.



**Figura 4.9** Distribución de la sobreelevación a través del tiempo del huracán Winifred.

Con los resultados de la sobreelevación obtenidas por el huracán Winifred, se adicionó a la marea de la figura 4.6, obteniéndose la nueva marea afectada por la sobreelevación (ver figura 4.10).



**Figura 4.10** Elevación del mar afectado por la sobreelevación del huracán Winifred

Tomando la información de la elevación del mar afectado por la sobreelevación (ver figura 4.10), se realizó la modelación numérica, utilizando el modelo hidrodinámico descrito en el capítulo 4.1.3. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 4.11 y 4.12.



**Figura 4.11** Corriente entrante producida por la marea y la sobreelevación al puerto de Manzanillo.



**Figura 4.12** Corriente saliente producida por la marea y la sobreelevación al puerto de Manzanillo.

Con los resultados antes mencionados, se utilizaron para realizar las simulaciones de maniobrabilidad, y se definió los tipos de barcos que se simularon en las diferentes bandas, dicha distribución se muestra en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6 Distribución de la simulación de los barcos para los efectos de marea y con sobre elevación.**

	No.	Modelo
Banda A	1	BULK06L
	2	CNTNR28L
	3	CARCO06L
	4	CNTNR31L
Banda B	5	BULK06L
	6	CNTNR28L
	7	CARCO06L
Banda C1	8	BULK06L
	9	CNTNR28L
	10	CARCO06L
	11	CNTNR31L
Banda C2	12	BULK06L
	13	CNTNR28L
	14	CARCO06L
	15	CNTNR31L
Banda C3	16	BULK06L
	17	CNTNR28L
	18	CARCO06L
	19	CNTNR31L

#### **4.1.6 Distribución de los amarres**

Otra de las condiciones importantes para realizar las simulaciones de maniobrabilidad es la colocación del sistema de amarre, el simulador de maniobras tiene una restricción, solo puede colocar un máximo de 6 amarras, tomando en cuenta dicha restricción, se colocó en el simulador las 6 amarras. La distribución y la colocación de las amarras en los cuatro barcos, se definió de acuerdo a la descripción de la figura 2.2.

Para el caso del buque Bulk Carrier (BULKC06L), este tipo de barco se acomodó en sentido de salida al puerto, y su distribución de las amarras se muestra en la figura 4.13.

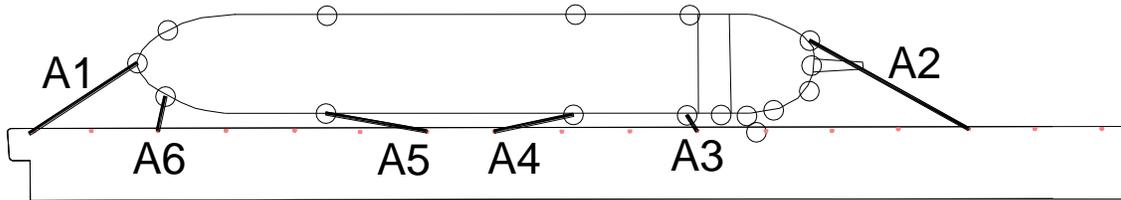


Figura 4.13 Distribución de las líneas de amarre para el Bulk Carrier (BULKC06L).

Para el caso del buque Container (CNTNR28L), este tipo de barco se acomodó en sentido de salida al puerto, y su distribución de las amarras se muestra en la figura 4.14.

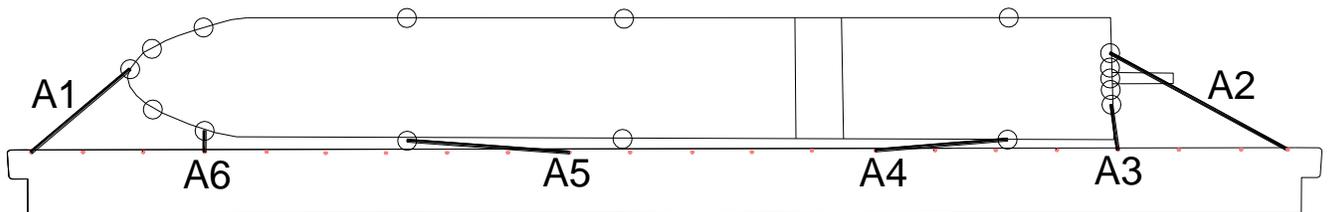


Figura 4.14 Distribución de las líneas de amarre para el Container (CNTNR28L).

Para el caso del buque Car Carrier (CARC06L), este tipo de buque se acomodó en sentido de entrada al puerto, ya que este tipo de barcos tiene su descarga del lado de estribor, y su distribución de las amarras se muestra en la figura 4.15.

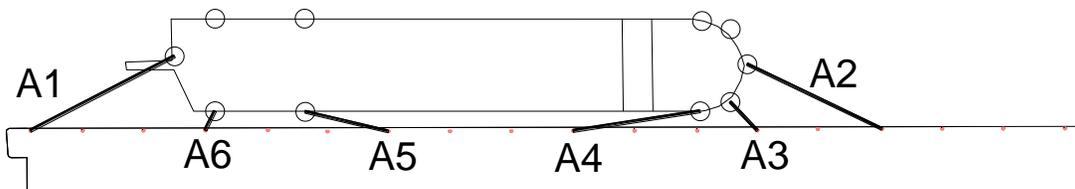
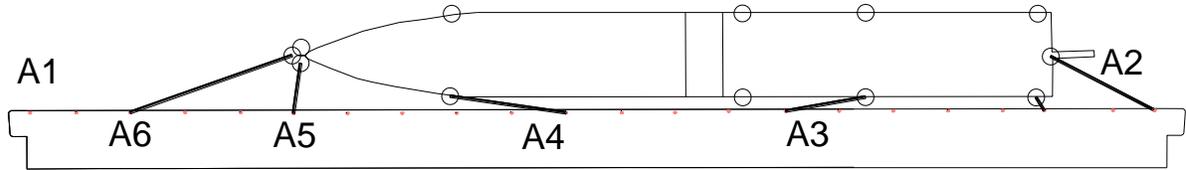


Figura 4.15 Distribución de las líneas de amarre para el Car Carrier (CARC06L).

Para el caso del barco Container (CNTNR31L), este tipo de barco se acomodó en sentido de salida al puerto, y su distribución de las amarras se muestra en la figura 4.16.



**Figura 4.16** Distribución de las líneas de amarre para el Container (CNTNR31L).

## 4.2 Resultados

Tomando en cuenta todas las condiciones antes mencionadas, se realizaron las simulaciones en el simulador de maniobras. Todos los barcos analizados se colocaron en las diferentes bandas y se realizó el amarre respectivo para cada uno de los barcos. Para el análisis de tensión de las amarras se obtuvo lo siguiente:

### 4.2.1 Tensión máxima de las amarras con viento reinante

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de las tensiones que se determinaron, utilizando el simulador de embarcaciones en tiempo real, se analizó y se calculó las tensiones máximas que se obtuvieron con las condiciones de viento reinante para cada uno de los barcos analizados, dichos resultados se presentan en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Tensiones máximas con la condición de viento reinante

	No.	Modelo	Viento Reinante		Amarra 1	Amarra 2	Amarra 3	Amarra 4	Amarra 5	Amarra 6
			Dirección (grados)	Velocidad (nudos)	Tensión (t)					
Banda "A"	1	BULK06L	247.5	10.4	0.00	0.00	8.91	0.00	4.32	9.11
	2	CNTNR28L	247.5	10.4	0.09	0.00	8.58	0.00	0.00	12.32
	3	CARCO06L	247.5	10.4	0.00	5.43	0.00	1.37	4.48	0.00
	4	CNTNRL31	247.5	10.4	0.00	0.00	9.49	0.00	0.00	8.14
Banda "B"	5	BULK06L	247.5	10.4	0.00	0.00	0.74	2.87	0.00	4.3
	6	CNTNR28L	247.5	10.4	2.1	0.00	0.00	3.4	0.00	0.14
	7	CARCO06L	247.5	10.4	0.00	0.00	1.49	0.00	1.86	0.59
Banda "C1"	8	BULK06L	247.5	10.4	3.68	0.04	0.01	0.3	3.24	0.01
	9	CNTNR28L	247.5	10.4	4.55	0.94	0.01	3.57	4.86	0.26
	10	CARCO06L	247.5	10.4	1.48	0.00	3.25	5.29	0.02	4.36
	11	CNTNRL31	247.5	10.4	5.13	3.37	0.01	4.75	4.57	2.86
Banda "C2"	12	BULK06L	247.5	10.4	0.23	0.86	0.00	1.71	1.02	0.00
	13	CNTNR28L	247.5	10.4	6.04	1.42	0.02	3.56	5.42	7.69
	14	CARCO06L	247.5	10.4	4.72	1.8	4.79	4.13	0.02	3.36
	15	CNTNRL31	247.5	10.4	5.32	2.93	0.01	4.33	4.52	4.06
Banda "C3"	16	BULK06L	247.5	10.4	0.03	1.09	0.00	1.14	0.05	0.00
	17	CNTNR28L	247.5	10.4	4.8	0	0.06	3.18	6.15	0.1
	18	CARCO06L	247.5	10.4	4.73	1.88	4.78	5.03	0.2	4.42
	19	CNTNRL31	247.5	10.4	4.22	4.43	0.02	4.77	3.84	0.02

## 4.2.2 Tensión máxima de las amarras con viento dominante

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de las tensiones que se determinaron, utilizando el simulador de embarcaciones en tiempo real, se analizó y se calculó las tensiones máximas que se obtuvieron con las condiciones de viento dominante para cada uno de los barcos analizados, dichos resultados se presentan en la tabla 4.8.

**Tabla 4.8 Tensiones máximas con la condición de viento dominante.**

	No .	Modelo	Viento Dominante		Amarra 1	Amarra 2	Amarra 3	Amarra 4	Amarra 5	Amarra 6
			Dirección (grados)	Velocidad (nudos)	Tensión (t)					
Banda "A"	1	BULK06L	247.5	32.1	0.00	0.00	13.74	2.98	14.70	17.36
	2	CNTNR28L	247.5	32.1	11.81	0.00	14.31	3.58	0.00	36.22
	3	CARCO06L	247.5	32.1	0.00	5.81	4.28	4.97	27.18	0.96
	4	CNTNRL31	247.5	32.1	13.00	0.00	18.73	5.11	0.00	26.76
Banda "B"	5	BULK06L	247.5	32.1	0.00	0.00	0.00	1.51	0.00	0.00
	6	CNTNR28L	247.5	32.1	7.40	5.08	4.98	4.89	11.14	12.05
	7	CARCO06L	247.5	32.1	0.00	0.00	5.34	0.00	0.00	0.00
Banda "C1"	8	BULK06L	247.5	32.1	3.98	0.03	0.01	0.08	5.12	0.46
	9	CNTNR28L	247.5	32.1	7.40	5.08	4.98	4.89	11.14	12.05
	10	CARCO06L	247.5	32.1	2.07	0.01	1.24	7.24	0.02	2.68
	11	CNTNRL31	247.5	32.1	7.21	4.99	4.78	5.22	7.67	13.05
Banda "C2"	12	BULK06L	247.5	32.1	5.78	4.70	1.47	4.24	6.11	8.23
	13	CNTNR28L	247.5	32.1	6.92	4.96	4.74	4.97	11.68	12.12
	14	CARCO06L	247.5	32.1	5.66	3.07	4.68	8.79	16.44	7.19
	15	CNTNRL31	247.5	32.1	6.93	4.98	4.68	4.98	8.34	13.80
Banda "C3"	16	BULK06L	247.5	32.1	4.15	4.89	0.00	4.92	4.51	1.00
	17	CNTNR28L	247.5	32.1	6.71	0.00	6.40	5.67	14.62	6.91
	18	CARCO06L	247.5	32.1	5.99	3.48	4.84	7.57	4.02	4.95
	19	CNTNRL31	247.5	32.1	4.97	6.14	3.44	5.34	8.05	4.19

### 4.2.3 Tensión máxima de las amarras por efecto de tsunami

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de las tensiones que se determinaron, utilizando el simulador de embarcaciones en tiempo real, se analizó y se calculó las tensiones máximas que se obtuvieron con las condiciones del efecto de un Tsunami (tsunami 1995), para cada uno de los barcos analizados, dichos resultados se presentan en la tabla 4.9.

**Tabla 4.9 Tensiones máximas con la condición de efecto del Tsunami de 1995.**

	No.	Modelo	Amarra 1	Amarra 2	Amarra 3	Amarra 4	Amarra 5	Amarra 6
			Tensión (t)					
Banda "A"	1	BULK06L	9.86	22.48	5.00	5.00	53.11	16.72
	2	CNTNR28L	8.80	5.37	7.99	6.31	5.00	9.78
	3	CARCO06L	5.00	5.00	5.00	5.75	5.69	6.81
	4	CNTNRL31	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Banda "B"	5	BULK06L	4.85	7.54	4.50	9.18	12.57	10.38
	6	CNTNR28L	5.36	5.51	5.43	5.39	5.88	5.00
	7	CARCO06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Banda "C1"	8	BULK06L	5.18	5.00	5.00	5.00	5.21	5.00
	9	CNTNR28L	6.40	5.00	5.00	5.64	5.09	5.33
	10	CARCO06L	5.00	5.00	5.00	5.66	5.00	5.00
	11	CNTNRL31	5.39	5.06	5.00	5.01	5.06	5.00
Banda "C2"	12	BULK06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.24	5.00
	13	CNTNR28L	6.69	5.00	5.00	5.00	5.24	8.61
	14	CARCO06L	5.69	4.78	4.97	5.43	4.72	4.98
	15	CNTNRL31	5.44	5.00	5.00	5.00	5.00	5.44
Banda "C3"	16	BULK06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.75	5.00
	17	CNTNR28L	0.00	0.00	5.00	5.18	6.04	5.24
	18	CARCO06L	5.09	0.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	19	CNTNRL31	5.00	5.01	5.00	5.35	5.24	5.00

#### 4.2.4 Tensión máxima de las amarras por efecto de la marea

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de las tensiones que se determinaron, utilizando el simulador de embarcaciones en tiempo real, se analizó y se calculó las tensiones máximas que se obtuvieron con las condiciones de solo marea, para cada uno de los barcos analizados, dichos resultados se presentan en la tabla 4.10.

**Tabla 4.10 Tensiones máximas con la condición de solo marea.**

	No.	Modelo	Amarra 1	Amarra 2	Amarra 3	Amarra 4	Amarra 5	Amarra 6
			Tensión (t)					
Banda "A"	1	BULK06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	2	CNTNR28L	4.94	4.98	4.86	6.08	4.97	4.72
	3	CARCO06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	4	CNTNRL31	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Banda "B"	5	BULK06L	4.86	4.95	4.58	4.88	4.89	4.31
	6	CNTNR28L	5.08	5.00	5.00	5.00	5.11	5.07
	7	CARCO06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Banda "C1"	8	BULK06L	5.20	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	9	CNTNR28L	6.48	5.00	5.00	5.00	5.11	7.14
	10	CARCO06L	5.00	5.12	0.00	5.00	5.93	0.00
	11	CNTNRL31	5.00	0.00	5.00	5.00	6.93	5.00
Banda "C2"	12	BULK06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.21	5.00
	13	CNTNR28L	6.61	5.00	5.00	5.00	5.34	8.50
	14	CARCO06L	5.59	5.00	5.00	5.47	5.00	5.00
	15	CNTNRL31	5.42	5.00	5.00	5.00	5.00	5.22
Banda "C3"	16	BULK06L	5.00	5.00	5.00	5.02	5.00	5.00
	17	CNTNR28L	5.04	5.00	5.00	5.00	5.98	5.20
	18	CARCO06L	5.29	5.00	5.00	5.55	5.00	5.00
	19	CNTNRL31	5.00	5.00	5.00	5.46	5.37	5.00

#### 4.2.5 Tensión máxima de las amarras por efecto de la marea y sobre elevación

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de las tensiones que se determinaron, utilizando el simulador de embarcaciones en tiempo real, se analizó y se calculó las tensiones máximas que se obtuvieron con las condiciones de marea y con efecto de sobre elevación causada por el huracán Winifred, para cada uno de los barcos analizados, dichos resultados se presentan en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 Tensiones máximas con la condición de marea y sobreelevación.

	No.	Modelo	Amarra 1	Amarra 2	Amarra 3	Amarra 4	Amarra 5	Amarra 6
			Tensión (t)					
Banda "A"	1	BULK06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	2	CNTNR28L	5.00	5.00	5.00	6.31	5.00	5.00
	3	CARCO06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	4	CNTNRL31	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Banda "B"	5	BULK06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	6	CNTNR28L	5.00	0.00	5.00	5.00	6.42	5.00
	7	CARCO06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Banda "C1"	8	BULK06L	5.27	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	9	CNTNR28L	6.51	5.00	5.00	5.00	5.11	6.88
	10	CARCO06L	5.00	5.00	5.00	5.16	5.00	5.00
	11	CNTNRL31	5.00	5.00	5.00	5.00	5.66	5.35
Banda "C2"	12	BULK06L	5.00	5.00	5.00	5.09	5.26	5.00
	13	CNTNR28L	6.76	5.00	5.00	5.00	5.17	8.53
	14	CARCO06L	5.43	5.00	5.00	5.41	5.00	5.00
	15	CNTNRL31	5.47	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Banda "C3"	16	BULK06L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	17	CNTNR28L	5.05	5.00	5.00	5.00	5.72	5.24
	18	CARCO06L	5.13	5.00	5.00	5.47	5.00	5.00
	19	CNTNRL31	5.00	5.02	5.00	5.27	5.18	5.00

Con los resultados obtenidos de las tensiones máximas, se definió lo siguiente:

Para el caso de las condiciones de viento reinante, los resultados de tensiones máximas en las amarras, se observó que en la banda A y con el buque Car Carrier y en la amarra 2, se presentó una tensión máxima de 5.43 t.

Para el caso de las condiciones de viento reinante, los resultados de tensiones máximas en las amarras, se observó que en la banda A y con el buque Car Carrier y en la amarra 5, se presentó una tensión máxima de 27.18 t.

Para el caso de las condiciones de viento reinante, los resultados de tensiones máximas en las amarras, se observó que en la banda A y con el buque Bulk Carrier y en la amarra 5, se presentó una tensión máxima de 53.11 t.

Para el caso de las condiciones de viento reinante, los resultados de tensiones máximas en las amarras, se observó que en la banda C2 y con el buque Container y en la amarra 1, se presentó una tensión máxima de 6.61 t.

Para el caso de las condiciones de viento reinante, los resultados de tensiones máximas en las amarras, se observó que en la banda C2 y con el buque Container y en la amarra 1, se presentó una tensión máxima de 6.76 t.

## 4.2.6 Movimientos verticales con viento reinante

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de los movimientos verticales que se determinaron, utilizando el simulador de embarcaciones en tiempo real, se analizó y se determinó los movimientos verticales (proa, popa, babor y estribor), que se obtuvieron con las condiciones de viento reinante para cada uno de los barcos analizados, dichos resultados se presentan en la tabla 4.12.

**Tabla 4.12 Movimientos verticales con la condición de viento reinante**

	No.	Modelo	Proa (cm)	Popa (cm)	Babor (cm)	Estribor (cm)
Banda "A"	1	BULK06L	0.0	0.0	1.0	-1.0
	2	CNTNR28L	0.0	0.0	1.0	-1.0
	3	CARCO06L	0.0	0.0	1.0	-1.0
	4	CNTNRL31	0.0	0.0	1.0	-1.0
Banda "B"	5	BULK06L	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	CNTNR28L	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	CARCO06L	0.0	0.0	0.0	0.0
Banda "C1"	8	BULK06L	0.0	0.0	-2.0	2.0
	9	CNTNR28L	0.0	0.0	-4.0	4.0
	10	CARCO06L	0.0	0.0	-4.0	4.0
	11	CNTNRL31	0.0	0.0	-8.0	8.0
Banda "C2"	12	BULK06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	13	CNTNR28L	0.0	0.0	-7.0	7.0
	14	CARCO06L	0.0	0.0	-6.0	6.0
	15	CNTNRL31	0.0	0.0	-9.0	9.0

Banda "C3"	16	BULK06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	17	CNTNR28L	0.0	0.0	-4.0	4.0
	18	CARCO06L	0.0	0.0	-6.0	6.0
	19	CNTNRL31	0.0	0.0	-8.0	8.0

## 4.2.7 Movimientos verticales con viento dominante

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de los movimientos verticales que se determinaron, utilizando el simulador de embarcaciones en tiempo real, se analizó y se determinó los movimientos verticales (proa, popa, babor y estribor), que se obtuvieron con las condiciones de viento dominante para cada uno de los barcos analizados, dichos resultados se presentan en la tabla 4.13.

**Tabla 4.13 Movimientos verticales con la condición de viento dominante**

	No.	Modelo	Proa (cm)	Popa (cm)	Babor (cm)	Estribor (cm)
Banda "A"	1	BULK06L	0.0	0.0	-2.0	2.0
	2	CNTNR28L	1.0	-1.0	-4.0	4.0
	3	CARCO06L	1.0	-1.0	-5.0	5.0
	4	CNTNRL31	0.0	0.0	-7.0	7.0
Banda "B"	5	BULK06L	0.0	0.0	12.0	-12.0
	6	CNTNR28L	0.0	0.0	27.0	-27.0
	7	CARCO06L	0.0	0.0	33.0	-33.0
Banda "C1"	8	BULK06L	0.0	0.0	-12.0	12.0
	9	CNTNR28L	0.0	0.0	-29.0	28.0
	10	CARCO06L	0.0	0.0	-30.0	30.0
	11	CNTNRL31	0.0	0.0	-59.0	59.0
Banda "C2"	12	BULK06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	13	CNTNR28L	0.0	0.0	-4.0	4.0
	14	CARCO06L	0.0	0.0	-6.0	6.0
	15	CNTNRL31	0.0	0.0	-8.0	8.0
Banda "C3"	16	BULK06L	0.0	0.0	-11.0	11.0
	17	CNTNR28L	0.0	0.0	-24.0	24.0
	18	CARCO06L	0.0	0.0	-30.0	30.0
	19	CNTNRL31	0.0	0.0	-56.0	56.0

## 4.2.8 Movimientos verticales por efecto de un tsunami

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de los movimientos verticales que se determinaron, utilizando el simulador de embarcaciones en tiempo real, se analizó y se determinó los movimientos verticales (proa, popa, babor y estribor), que se obtuvieron con las condiciones del efecto del tsunami, para cada uno de los barcos analizados, dichos resultados se presentan en la tabla 4.14.

**Tabla 4.14 Movimientos verticales con la condición del efecto de un tsunami**

	No.	Modelo	Proa (cm)	Popa (cm)	Babor (cm)	Estribor (cm)
Banda "A"	1	BULK06L	-3.0	3.0	14.0	-14.0
	2	CNTNR28L	-2.0	2.0	14.0	-14.0
	3	CARCO06L	-2.0	2.0	20.0	-20.0
	4	CNTNRL31	-2.0	2.0	12.0	-12.0
Banda "B"	5	BULK06L	-1.0	1.0	-3.0	3.0
	6	CNTNR28L	-2.0	2.0	-5.0	5.0
	7	CARCO06L	0.0	0.0	2.0	-2.0
Banda "C1"	8	BULK06L	-1.0	1.0	-1.0	1.0
	9	CNTNR28L	-1.0	1.0	-1.0	1.0
	10	CARCO06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	11	CNTNRL31	-1.0	1.0	-2.0	2.0
Banda "C2"	12	BULK06L	-1.0	1.0	-1.0	1.0
	13	CNTNR28L	0.0	0.0	-2.0	2.0
	14	CARCO06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	15	CNTNRL31	-1.0	1.0	-4.0	4.0
Banda "C3"	16	BULK06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	17	CNTNR28L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	18	CARCO06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	19	CNTNRL31	0.0	0.0	-2.0	2.0

## 4.2.9 Movimientos verticales por marea

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de los movimientos verticales que se determinaron, utilizando el simulador de embarcaciones en tiempo real, se analizó y se determinó los movimientos verticales (proa, popa, babor y estribor), que se obtuvieron con las condiciones del efecto de la marea, para cada uno de los barcos analizados, dichos resultados se presentan en la tabla 4.15.

**Tabla 4.15 Movimientos verticales con la condición del efecto de la marea**

	No.	Modelo	Proa (cm)	Popa (cm)	Babor (cm)	Estribor (cm)
Banda "A"	1	BULK06L	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	CNTNR28L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	3	CARCO06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	4	CNTNRL31	0.0	0.0	0.0	0.0
Banda "B"	5	BULK06L	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	CNTNR28L	0.0	0.0	1.0	-1.0
	7	CARCO06L	0.0	0.0	2.0	-2.0
Banda "C1"	8	BULK06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	9	CNTNR28L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	10	CARCO06L	0.0	0.0	0.0	0.0
	11	CNTNRL31	0.0	0.0	-1.0	1.0
Banda "C2"	12	BULK06L	0.0	0.0	0.0	0.0
	13	CNTNR28L	0.0	0.0	-3.0	3.0
	14	CARCO06L	0.0	0.0	-2.0	2.0
	15	CNTNRL31	0.0	0.0	-2.0	2.0
Banda "C3"	16	BULK06L	0.0	0.0	0.0	0.0
	17	CNTNR28L	0.0	0.0	1.0	-1.0
	18	CARCO06L	0.0	0.0	3.0	-3.0
	19	CNTNRL31	0.0	0.0	2.0	-2.0

## 4.2.10 Movimientos verticales por marea y sobreelevación

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de los movimientos verticales que se determinaron, utilizando el simulador de embarcaciones en tiempo real, se analizó y se determinó los movimientos verticales (proa, popa, babor y estribor), que se obtuvieron con las condiciones del efecto de la marea y con la sobreelevación causada por el huracán Winifred, para cada uno de los barcos analizados, dichos resultados se presentan en la tabla 4.16.

**Tabla 4.16 Movimientos verticales con la condición del efecto de la marea y sobreelevación**

	No.	Modelo	Proa (cm)	Popa (cm)	Babor (cm)	Estribor (cm)
Banda "A"	1	BULK06L	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	CNTNR28L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	3	CARCO06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	4	CNTNRL31	0.0	0.0	0.0	0.0
Banda "B"	5	BULK06L	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	CNTNR28L	0.0	0.0	1.0	-1.0
	7	CARCO06L	0.0	0.0	-2.0	2.0
Banda "C1"	8	BULK06L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	9	CNTNR28L	0.0	0.0	-1.0	1.0
	10	CARCO06L	0.0	0.0	-2.0	2.0
	11	CNTNRL31	0.0	0.0	-2.0	2.0
Banda "C2"	12	BULK06L	0.0	0.0	0.0	0.0
	13	CNTNR28L	0.0	0.0	-3.0	3.0
	14	CARCO06L	0.0	0.0	-2.0	2.0
	15	CNTNRL31	0.0	0.0	-2.0	2.0
Banda "C3"	16	BULK06L	0.0	0.0	0.0	0.0
	17	CNTNR28L	0.0	0.0	-2.0	2.0
	18	CARCO06L	0.0	0.0	-3.0	3.0
	19	CNTNRL31	0.0	0.0	-2.0	2.0

Con los resultados obtenidos de los movimientos verticales, se definió lo siguiente:

Para el caso de las condiciones de viento reinante, los resultados de los movimientos verticales, se observó que en la banda C2 y con el buque Container, se presentó un movimiento vertical de babor de -9.0 cm y de 9.0 cm en estribor.

Para el caso de las condiciones de viento dominante, los resultados de los movimientos verticales, se observó que en la banda C1 y con el buque Container, se presentó un movimiento vertical de babor de -59.0 cm y de 59.0 cm en estribor.

Para el caso de las condiciones con efecto del tsunami, los resultados de los movimientos verticales, se observó que en la banda C1 y con el buque Container, se presentó un movimiento vertical de proa de -2 cm, popa de 2 cm, de babor de 20.0 cm y de -20.0 cm en estribor.

Para el caso de las condiciones de solo marea, los resultados de los movimientos verticales, se observó que en la banda C2 y con el buque Container, se presentó un movimiento vertical de babor de -3.0 cm y de 3.0 cm en estribor.

Para el caso de las condiciones de solo marea, los resultados de los movimientos verticales, se observó que en la banda C3 y con el buque Container, se presentó un movimiento vertical de babor de -3.0 cm y de 3.0 cm en estribor.



## Conclusiones

---

De acuerdo con los resultados que se obtuvieron para determinar los movimientos del buque atracado en el Puerto de Manzanillo, Col. En las bandas A, B y C y determinar una forma segura en el atraque, se concluyó lo siguiente.

Se realizaron y analizaron 95 corridas en el simulador de maniobras de embarcaciones en tiempo real del IMT, se pudo observar que con los modelos establecidos con 6 líneas de amarre se podía mantener el buque atracado conservando los límites operativos de los movimientos y tensiones permisibles de acuerdo a la PIANC, las fuerzas en las líneas de amarre no superaban la tensión de ruptura, no obstante en la realidad para poder obtener un límite operativo de seguridad con las condiciones meteorológicas y climatológicas que se presentan en el puerto, se utilizan por lo menos 12 líneas de amarre para distribuir de manera uniforme las tensiones en las amarras.

Al realizar el análisis de los movimientos verticales, se observó que cuando se realizaron las simulaciones tomando en cuenta las condiciones de viento reinante, viento dominante, tsunami, marea astronómica y marea con sobreelevación, se observó que la condición de viento dominante, generó movimientos verticales de hasta 60 cm, por lo tanto, cuando se presenten las condiciones anteriores de viento deben colocarse todas las amarras necesarias para la estabilidad del barco en el puerto.

El desarrollo del análisis de los sistemas de amarre dinámico, en un simulador de maniobras de embarcaciones en tiempo real, permite observar y analizar la dinámica del buque y el comportamiento de las líneas de amarre, en comparación con un análisis estático en donde solo se obtienen resultados numéricos.



## Bibliografía

---

Permanent International Association of Navigation Congresses (1995): Criteria for movements of moored ships in harbours, a practical guide. Report of Working Group No. 24, of the Permanent Technical Committee II.

Ricard Marí Sagarra (2006): Maniobra de los Barcos, Ataraxiainc, Bogota, Chibchombia.

Kongsberg Maritime Inc. (2008): Manual técnico sección 5A. Manual del Instructor Polaris. Noruega.



**COMUNICACIONES**  
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



**Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"**  
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,  
Querétaro, México. C.P. 76703  
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610  
Fax: +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

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