



**Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Barranquilla**

Lida Patricia Trujillo Castañeda

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible

Bogotá, Colombia

01 de abril de 2024

**Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio Climático para el puerto de Compas Barranquilla**

**Lida Patricia Trujillo Castañeda**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**Magister en Proyectos de Desarrollo Sostenible**

Directora:

Elizabeth León Velásquez

Modalidad:

**Trabajo Dirigido**

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Programa Magister en Proyectos de Desarrollo Sostenible

Bogotá, Colombia

01 de abril de 2024

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá, 16/04/2024

A mi padre por enseñarme lo valioso del conocimiento, su inmensidad y lo pequeños que somos ante él.

## **Agradecimientos**

A mi Familia por su comprensión y apoyo en todo momento.

A mi tutora, Elizabeth Velázquez, por su guía y disposición para llevar a cabo nuestros compromisos.

A la Compañía de Puertos Asociados - Compas S.A, en especial a Zulady Pretel, Moisés Sabagh y Laura González; quienes, con su experiencia y conocimiento del puerto, permitieron el desarrollo de este trabajo.

Al IDEAM, la DIMAR, CORMAGDALENA, y CECOLDO, por monitorear y registrar todo lo relacionado con los fenómenos climáticos del país facilitando los datos necesarios para el análisis y desarrollar este estudio.

A la EAN, centro de estudios nacional, enfocado en la sostenibilidad, como pilar de todas las actividades que se realizan para el progreso y avance del país y el planeta.

A mi colega Alina Aguilar y la Fundación Internacional María Luisa de Moreno, por darme la oportunidad de seguirme preparando y actualizando; para aplicar mis conocimientos en el territorio.

## Resumen

Los impactos del cambio climático se han acentuado aceleradamente y representan una amenaza significativa para el desarrollo en Latinoamérica, y Colombia no es la excepción, por el rol que desempeñan los puertos en el transporte fluvial, marítimo y su conexión con el mundo y la economía global. Este trabajo de investigación estableció el grado de vulnerabilidad al cambio climático del puerto COMPAS, ubicado en Barranquilla – Colombia y formula las estrategias de adaptación acorde con los riesgos evaluados con el fin de mantener la operatividad y eficiencia de este. Se realizó un análisis interno mediante instrumento estructurado; un análisis externo a partir de una matriz DOFA; un análisis descriptivo y modelado de las variables meteorológicas: temperatura, precipitación, nivel del mar, nivel del río y sedimentación por series de tiempo entre 1972 y 2022, y finalmente la evaluación de vulnerabilidad a partir del Índice de Riesgo Climático Empresarial (IRCE) y la Vulnerabilidad Climática Empresarial (VuCE) que fundamentan el plan de intervención, monitoreo y seguimiento para el puerto COMPAS Barranquilla. Los resultados, de la consulta bibliográfica, indican la importancia de los puertos para mantener la conectividad y economía mundial, obligando a los países, regiones, municipios y el sector portuario, a tomar las medidas de adaptación necesarias ante la vulnerabilidad de la infraestructura, la operación, el personal y la comunidad de la zona de influencia frente a los inminentes efectos del cambio climático. En el Puerto de Barranquilla se determinaron los riesgos que enfrenta antes sucesos climáticos y su vulnerabilidad en diferentes aspectos; se establecieron diez (10) impactos posibles de eventos y efectos asociados al cambio climático para proponer trece (13) medidas de adaptación que permitan la permanencia y sostenibilidad del puerto en las próximas décadas.

**Palabras clave:** sector portuario, cambio climático, riesgo climático, análisis de vulnerabilidad climática, adaptación, Barranquilla.

### **Abstract**

The impacts of climate change have accelerated and represent a significant threat to development in Latin America and the Caribbean due to the role played by ports in river and maritime transport and the global economy. This research work established the degree of vulnerability to climate change of the COMPAS port, located in Barranquilla – Colombia and formulates adaptation strategies according to the risks evaluated in order to maintain operational its operability and efficiency. An internal analysis was carried out using a structured instrument; an external analysis based on a SWOT matrix; a descriptive and modeled analysis of meteorological variables: temperature, precipitation, sea level, river level and sedimentation by time series between 1972 and 2022, and finally the vulnerability assessment based on the Climate Risk Index (IRCE) and Corporate Climate Vulnerability (VuCE) that underpin the intervention, monitoring and follow-up plan for the COMPAS Barranquilla port. The results indicate the importance of ports in sustaining the global economy, forcing countries, regions, municipalities and the port sector to take the necessary adaptation measures in the face of the vulnerability of infrastructure, operation, personnel and the community of the area of influence in the face of imminent climate change. In the Port of Barranquilla, the risks faced by climatic events were determined, and their vulnerability in different aspects; ten (10) possible impacts of events and effects associated with climate change were established to propose thirteen (13) adaptation measures that allow the permanence and sustainability of the port in the coming decades.

**Keywords:** port sector, climate change, climate risk, climate vulnerability analysis, adaptation, Barranquilla.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Barranquilla

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>17</b>
<b>4. MARCO INSTITUCIONAL .....</b>	<b>19</b>
4.1. REFERENTES ESTRATÉGICOS .....	21
4.1.2. <i>Misión y visión</i> .....	22
4.2. ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL .....	24
4.3. SERVICIOS OFERTADOS .....	26
4.4. INFRAESTRUCTURA DEL PUERTO DE BARRANQUILLA .....	28
4.4.1. <i>Análisis territorial, operativo y organizacional del puerto COMPAS Barranquilla</i> .....	29
4.4.2. <i>Canales de acceso</i> .....	30
4.4.3. <i>Áreas de maniobra y atraque</i> .....	30
4.4.4. <i>Parámetros constructivos</i> .....	30
4.4.4.1. <i>Tipología constructiva.</i> .....	31
4.4.5. <i>Ayudas a la navegación</i> .....	32
4.4.6. <i>Áreas de fondeo</i> .....	32
4.4.7. <i>Calado operacional</i> .....	32
4.4.8. <i>Accesos vehiculares, férreos y peatonales</i> .....	32
<b>5. MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>33</b>
5.1. ANÁLISIS DEL SECTOR PORTUARIO .....	33
5.2. BARRANQUILLA, ÁREA DE ESTUDIO .....	38
5.3. CAMBIO CLIMÁTICO Y LA AFECTACIÓN EN ZONA PORTUARIA DE BARRANQUILLA.....	42

# Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Barranquilla

5.4 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO .....	43
5.4.1 Componentes de la evaluación de la vulnerabilidad .....	43
5.4.1.1. Amenaza.....	44
5.4.1.2. Exposición. ....	46
5.4.1.3. Sensibilidad .....	47
5.4.1.4. Impacto Potencial .....	47
5.4.1.5. Capacidad Adaptativa .....	47
5.4.1.6. Vulnerabilidad.....	49
5.5. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS PUERTOS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO .....	52
5.5.1. Puertos fluviales.....	53
5.5.2 Sedimentos .....	60
<b>6. DISEÑO METODOLOGICO .....</b>	<b>63</b>
6.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	63
6.2. ANÁLISIS INTERNO.....	63
6.2.1 Diseño del instrumento .....	64
6.2.2. Validación del instrumento .....	64
6.3 ANÁLISIS EXTERNO .....	65
6.3.1. DOFA .....	65
6.3.2. Evaluación de variables meteorológicas.....	66
6.3.3.1. Cálculo del índice de riesgo climático - IRCE .....	71
6.3.3.2. Cálculo de la vulnerabilidad climática empresarial - VuCE .....	71
6.4. DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	71
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>72</b>
7.1. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS Y TERRITORIALES DEL PUERTO .....	72
7.1.1. Medición interna frente al cambio climático .....	72
7.1.2. Análisis DOFA.....	78

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Barranquilla

7.1.3. Análisis de variables meteorológicas asociadas al cambio climático.....	80
7.1.3.1. Análisis descriptivo de temperatura.....	84
7.1.3.1.1. Modelo analítico de temperatura.....	89
7.1.3.2. Análisis descriptivo de precipitación.....	96
7.1.3.2.1. Modelo analítico de precipitación.....	99
7.1.3.3. Análisis de nivel del mar.....	106
7.1.3.4. Análisis del nivel del río Magdalena.....	112
7.1.3.5. Análisis de correlación entre precipitación, nivel del río y sedimentación.....	126
7.1.4. Escenarios de Cambio Climático.....	131
7.1.4.1. Línea de costa y erosión.....	134
7.1.4.2. Huella Ambiental portuaria.....	134
7.1.4.3. Emisiones al aire.....	135
7.1.5. Análisis de vulnerabilidad al cambio climático en el puerto COMPAS de Barranquilla.....	136
7.1.5.1. Cálculo del índice de riesgo climático empresarial - IRCE.....	136
7.1.5.2. Cálculo de la Vulnerabilidad Climática Empresarial - VuCE.....	142
<b>8. PLAN DE INTERVENCIÓN PARA LA ADOPCIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PUERTO COMPAS BARRANQUILLA.....</b>	<b>152</b>
8.1. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN IDENTIFICADAS.....	153
8.2. CRONOGRAMA Y COSTOS.....	158
8.3. SEGUIMIENTO, MONITOREO Y EVALUACIÓN.....	163
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>163</b>
<b>10. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>165</b>
<b>11. REFERENCIAS.....</b>	<b>167</b>
<b>ANEXO 1. ENCUESTA.....</b>	<b>175</b>

**Lista de figuras**

FIGURA 1 .....	20
FIGURA 2 .....	21
FIGURA 3 .....	22
FIGURA 4 .....	24
FIGURA 5 .....	26
FIGURA 6 .....	27
FIGURA 7 .....	28
FIGURA 8 .....	35
FIGURA 9 .....	39
FIGURA 10 .....	40
FIGURA 11 .....	44
FIGURA 12 .....	73
FIGURA 13 .....	78
FIGURA 14 .....	79
FIGURA 15 .....	81
FIGURA 16 .....	83
FIGURA 17 .....	85
FIGURA 18 .....	86
FIGURA 19 .....	88
FIGURA 20 .....	89
FIGURA 21 .....	90
FIGURA 22 .....	91
FIGURA 23 .....	93
FIGURA 24 .....	94
FIGURA 25 .....	97
FIGURA 26 .....	98

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Barranquilla

FIGURA 27 .....	99
FIGURA 28 .....	100
FIGURA 29 .....	101
FIGURA 30 .....	102
FIGURA 31 .....	103
FIGURA 32 .....	106
FIGURA 33 .....	107
FIGURA 34 .....	109
FIGURA 35 .....	110
FIGURA 36 .....	112
FIGURA 37 .....	113
FIGURA 38 .....	115
FIGURA 39 .....	116
FIGURA 40 .....	119
FIGURA 41 .....	120
FIGURA 42 .....	122
FIGURA 43 .....	123
FIGURA 44 .....	127
FIGURA 45 .....	128
FIGURA 46 .....	133

## Lista de tablas

TABLA 1.....	28
TABLA 2.....	45
TABLA 3.....	51
TABLA 4.....	58
TABLA 5.....	63
TABLA 6.....	74
TABLA 7.....	76
TABLA 8.....	80
TABLA 9.....	91
TABLA 10.....	92
TABLA 11.....	94
TABLA 12.....	95
TABLA 13.....	96
TABLA 14.....	100
TABLA 15.....	103
TABLA 16.....	104
TABLA 17.....	105
TABLA 18.....	107
TABLA 19.....	108
TABLA 20.....	110
TABLA 21.....	111
TABLA 22.....	111
TABLA 23.....	113
TABLA 24.....	114
TABLA 25.....	116
TABLA 26.....	117

TABLA 27 .....	118
TABLA 28 .....	119
TABLA 29 .....	121
TABLA 30 .....	123
TABLA 31 .....	124
TABLA 32 .....	125
TABLA 33 .....	131
TABLA 34 .....	132
TABLA 35 .....	133
TABLA 36 .....	135
TABLA 37 .....	135
TABLA 38 .....	136
TABLA 39 .....	138
TABLA 40 .....	139
TABLA 41 .....	140
TABLA 42 .....	141
TABLA 43 .....	141
TABLA 44 .....	142
TABLA 45 .....	143
TABLA 46 .....	144
TABLA 47 .....	149
TABLA 48 .....	149
TABLA 49 .....	150
TABLA 50 .....	151
TABLA 51 .....	154
TABLA 52 .....	157
TABLA 53 .....	158

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La vida moderna nos lleva a buscar un equilibrio entre el crecimiento y eficiencia económica con la conservación del medio ambiente, en busca de un desarrollo sostenible. En el mundo, múltiples entidades públicas y privadas promueven normas y principios para fortalecer un desarrollo sostenible, particularmente en tres escenarios claves: el económico, el social y el ambiental.

Las Naciones Unidas-UN, es una de las entidades que ha tomado la vocería del mundo, con la promulgación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible-ODS (UN 2018 – 1), en una agenda suscrita por más de 190 países miembros y se convierte en una guía o referente hasta 2030. En total son 17 objetivos, donde ocupan un puesto destacado el crecimiento económico inclusivo, las ciudades inteligentes y el cambio climático, y se promueve la construcción de políticas públicas, además de múltiples instrumentos para el monitoreo del avance como el Conpes 3918 (2018-2), que orienta la asimilación de los objetivos y sus 169 metas en Colombia.

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, tiene una importante relación con el sistema de los puertos en el mundo, aunque ningún ODS está enfocado en el transporte marítimo (Lizalde, 2018-3), este tipo de transporte está relacionado con el desarrollo sustentable y con varios de los ODS donde se destacan objetivos como: el 6 “agua limpia y saneamiento”, el 7 “energía asequible y no contaminante”, el 11 “ciudades y comunidades sostenibles”, el 12 “producción y consumo sostenible”, 13 “acción por el clima” y el 14 “vida submarina”, cada uno con su especificidad de acuerdo a la ubicación del puerto.

Por lo anterior, el presente trabajo surge de una necesidad imperiosa de la empresa COMPAS, que se encuentra en el sector portuario, ubicado en los litorales Caribe y Pacífico, de responder a la pregunta ¿Cuál es el grado de vulnerabilidad frente al cambio climático del puerto COMPAS de Barraquilla; y las posibles medidas de adaptación que requiere para mantener el funcionamiento del puerto?

Para responder a este cuestionamiento, se determina aplicar la metodología propuesta por los entes líderes del sector en Colombia, Los Ministerios de Transporte y Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Invermar; el Plan de gestión del cambio climático para puertos marítimos de Colombia (2016) Primero, se realizó toda la fase preparatoria donde se establecen las condiciones actuales del puerto, se visitan sus instalaciones para hacer un recorrido visual y se entrevista personal de la empresa. Seguidamente, se realizó el análisis estadístico con las variables meteorológicas definidas, y se contrarrestan con los procesos, instalaciones y personal de la compañía para establecer los riesgos asociados a la exposición y la sensibilidad y en caso de que esos riesgos se hagan realidad que tan vulnerable es COMPAS; para no caer en el desastre es importante gestionar los riesgos identificados y paralelamente proponer medidas de adaptación al cambio climático.

Igualmente se evaluó la capacidad de adaptación de la empresa mediante el análisis de su infraestructura, procesos operativos y recursos humanos. Se identificaron áreas críticas que requieren mejoras para fortalecer la resiliencia frente a eventos climáticos extremos y cambios en las condiciones medioambientales. Con base en los resultados obtenidos, se propusieron medidas específicas de adaptación y se estableció un plan de implementación que aborde las medidas propuestas, junto con estimaciones de costos asociados. Este plan permitirá que la compañía realice una gestión eficiente de recursos financieros y humanos para la ejecución exitosa de las acciones de adaptación. Es importante que la empresa establezca posteriormente un sistema de monitoreo continuo para evaluar la efectividad de las medidas implementadas y realizar ajustes según sea necesario, lo anterior ayudará a garantizar la adaptación.

En resumen, esta investigación integral busca no solo evaluar la vulnerabilidad de la empresa al cambio climático, sino también proponer un plan estratégico de adaptación que permita enfrentar los desafíos futuros de manera proactiva y sostenible.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Establecer el grado de vulnerabilidad al cambio climático y las estrategias de adaptación en el puerto COMPAS, ubicado en Barranquilla – Colombia.

### 2.2. Objetivos específicos

Estimar las características operativas y territoriales del puerto COMPAS Barranquilla y su perspectiva organizacional frente al cambio climático.

Determinar la línea base de comportamiento climático del puerto COMPAS en Barranquilla fundamentado en las variables meteorológicas de la zona.

Realizar el análisis de vulnerabilidad al cambio climático en el puerto de COMPAS Barranquilla

Proponer las estrategias de adaptación al cambio climático acorde con el grado de vulnerabilidad y los requerimientos operativos y estratégicos de las instalaciones y el plan para su implementación.

### 3. JUSTIFICACIÓN

El mercado externo en Colombia tiene un peso representativo en la economía de nuestro país. Según cifras del Departamento Nacional de Estadísticas DANE, en los reportes a noviembre de 2023 las proyecciones de exportaciones totales estaban por los \$45 Mil Millones y las importaciones por un valor cercano a los \$54 mil millones (DANE, 2023) y en según cifras publicadas por la consultora de análisis económico, Sectorial, en 2022 un 79% de los exportaciones se movieron a través de los puertos, en tanto el 21% restante los hace a través de otros medios, incluso menciona que al analizar por pesos porcentuales, la carga que sale del país, a través de los puertos ese porcentaje alcanza el 98% (Sectorial, 2022).

Estas cifras de nuestro país muestran alta similitud con las alcanzadas en comercio mundial, donde según publicaciones de las naciones unidas los puertos se convierten en articuladores de las cadenas de suministros globales, promueven la competitividad y generan crecimientos económicos (UNCTAD, 2020), sin embargo son espacios asociados a riesgos relacionados con el cambio climático, que no solo pone en riesgo su operatividad sino también la economía del país.

Uno de los efectos que podría tener mayor impacto, causados por el cambio climático, en los desarrollos empresariales ubicados en las zonas costeras del mundo, es el aumento del nivel del mar (Cabañas Tovar et al., 2021) que ha sido alertado también en documentos como el Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático – IPCC, que describe un continuo y acelerado aumento en el nivel mar que podría, incluso, poner en riesgo los ecosistemas costeros (IPCC, 2022) . El incremento de la temperatura también se describe como otro de los factores que puede afectar las operaciones en zona costera, al igual que las ráfagas de viento y las tormentas eléctricas, las cuales se convierten en variables climáticas que amenazan y ponen en riesgo la infraestructura y operación de los puertos.

En el caso de Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM -, ha venido publicando informes que pronostican incrementos de la temperatura que incluyen un fenómeno del niño, con alta probabilidad de ocurrencia para finales de 2023 e inicio de 2024 (Ruiz Murcia & Melo Franco, 2024).

El papel de Colombia es fundamental en el desarrollo económico de Latinoamérica, en especial por su estratégica ubicación y su riqueza al tener puertos en los dos océanos (IDB Invest, 2023), que tomar todas las medidas necesarias para mitigar al máximo los impactos que pueda causar el cambio climático, resulta fundamental tal como se observa en las decisiones que toma el nuestro gobierno con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático PNACC (DNP & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023) y la misión de Sabios (Colciencias et al., 2019) y su foco temático denominado: Océanos y recursos hidrobiológicos.

Por todo lo mencionado hasta el momento, es que el papel de la academia y en este caso la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible, juega un papel importante para articular esas investigaciones aplicadas hacia Modelos de Sostenibilidad y desarrollo de indicadores de implementación de los ODS con las necesidades del sector empresarial nacional y en conjunto buscar soluciones en busca de un sólido desarrollo sostenible, sustentable y rentable, en los económico, social y ambiental, que se materializa hoy con este resultado de trabajo de grado.

Esta sinergia entre la Compañía de puertos asociados S.A, COMPAS y la academia, ha tenido como fundamento el estudio de un sector líder la economía del país, que opera la única red de puertos multipropósito en Colombia de capital privado, que opera cinco terminales, ubicados en la costa del pacífico como en la del mar caribe del país (COMPAS, 2022), incluyendo una en Barranquilla sobre el río Magdalena. COMPAS se preocupa por garantizar una operación segura, por lo cual sus políticas se basan en la planeación estratégica y la gestión de riesgos.

Esta relación Universidad – Empresa, tuvo como punto de partida el trabajo realizado por Padilla y Palacios (2021) en el puerto Compas Tolú (Fuentes Padilla & Pretel Palacios, 2021), que motivó a responder la pregunta, ¿Cuál es el grado de vulnerabilidad frente al cambio

climático del puerto fluvial de Barranquilla?, considerando variables meteorológicas: temperatura, precipitación, nivel del mar, nivel del río y sedimentación, para establecer medidas de adaptación que faciliten la operación del puerto, aportando así, al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible número 13: acción por el clima y número 9: Industria, Innovación e Infraestructura (COMPAS, 2022).

Se espera, que los resultados de este proyecto permitan gestionar adecuadamente los riesgos asociados al cambio climático, evitando el incremento en los costos de operación y mantenimiento asociados a las afectaciones por eventos climáticos en el puerto de COMPAS, en Barranquilla; además del diseño e implementación de planes de adaptación dirigidos a la resiliencia y al empoderamiento de las organizaciones como actores mitigantes de emisión de GEI, alineados con los compromisos de la agenda 2030 para alcanzar los ODS, como lo establece la Política de Sostenibilidad Empresarial de COMPAS S.A.

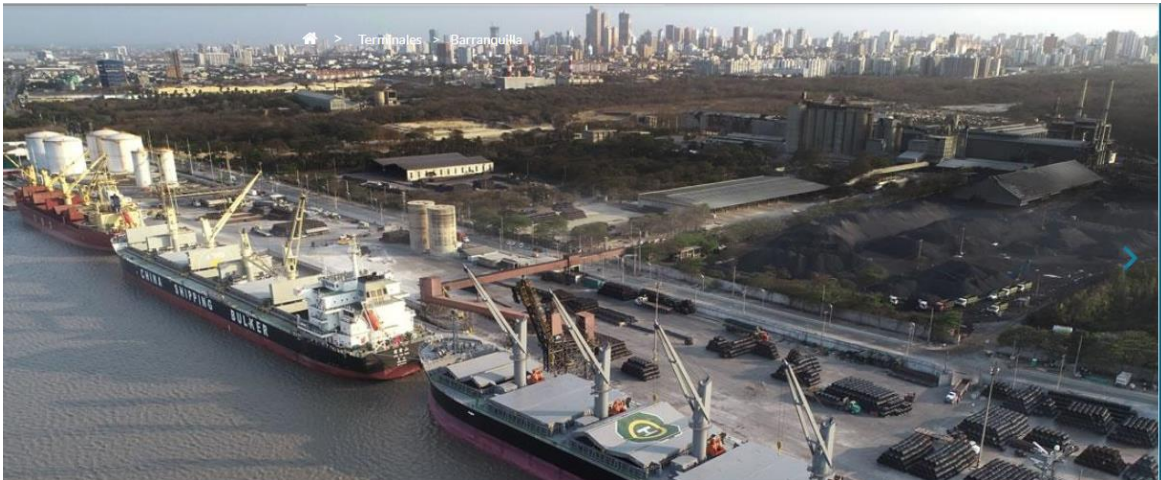
#### 4. MARCO INSTITUCIONAL

El perfil organizacional de COMPAS, publicado en el informe de gestión 2022 (COMPAS) y disponible en su página web, identifica una empresa del sector portuario y logístico con 30 años de existencia que incluye operaciones, hasta 2022, en Houston, Texas (USA), que hoy en día presta servicios estratégicos a múltiples cadenas de valor para comercializadores, productores y distribuidores en diversos renglones de la economía nacional e internacional. Además, y tal como se mencionó anteriormente con cinco terminales en ambas costas del país y un puerto sobre el río Magdalena en Barranquilla (Figura 1).

Como operador portuario, COMPAS se proporciona servicio de cargue, descargue y almacenamiento de materiales tanto en procesos de importación como exportación, que incluyen: maquinaria, herramientas y autopartes, insumos de la construcción e industria del carbón alimentos, hidrocarburos y fertilizantes, además de prestar servicios Bróker de fletamento.

## Figura 1

### *Panorámica del puerto de Barranquilla*



Nota. Fuente: Compas (2023)

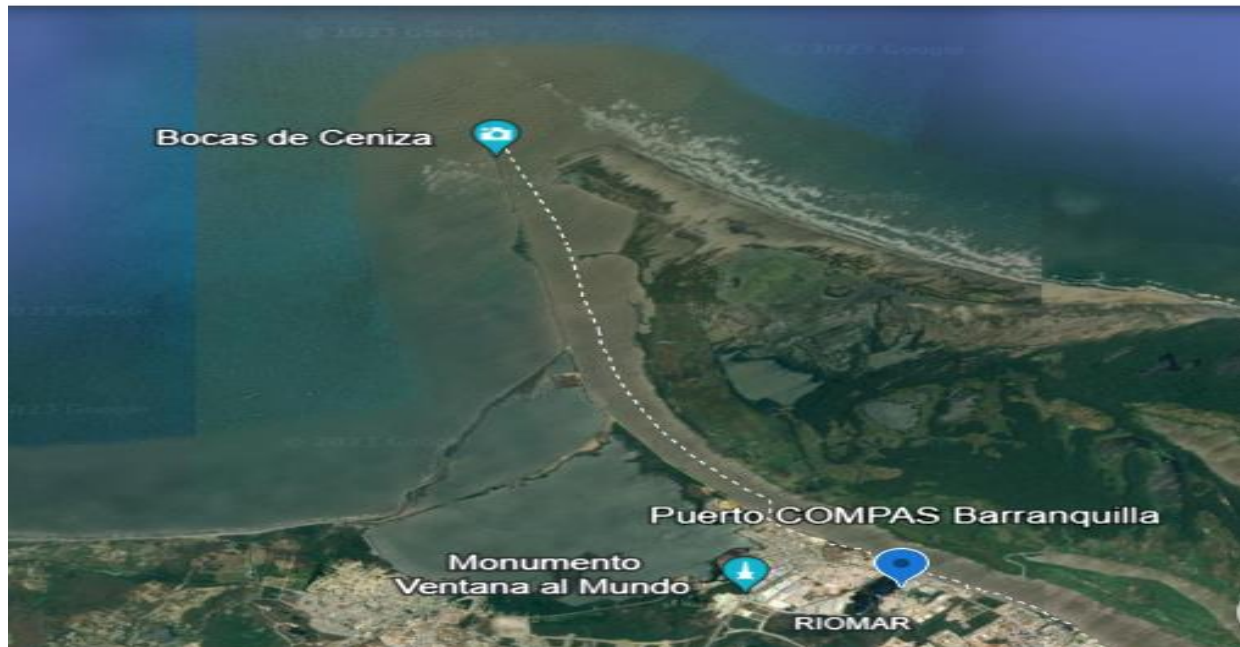
La composición accionaria, según el informe de gestión 2022, es compartida en porcentajes iguales (50% cada uno) entre el fondo de inversión West Street Infrastructure Partners (WSIP) y Southern Ports Holdings S. de R. L.

La fuerza laboral de COMPAS, según el informe de gestión 2022, está compuesta por 333 trabajadores, de los cuales tan solo 20 son contratistas. Frente a sus finanzas se puede observar que \$235.892 millones corresponde a ingresos operacionales, \$1,239 billones estuvieron representados en activos para el cierre del año 2022, lo cual representó un crecimiento, para el año 2021, del 21,9% respecto al año anterior.

El terminal COMPAS Barranquilla, está ubicado en la margen izquierda de la desembocadura del Río Magdalena al mar Caribe (Figura 2), cuenta con una capacidad instalada de 3 millones de toneladas (T) en un área de 24 ha.

## Figura 2

*Localización del puerto COMPAS en Barranquilla*



*Nota.* Fuente: Google Earth (2023)

### 4.1. Referentes estratégicos

El talento humano es uno de los activos más importantes con los que cuenta COMPAS, donde se resalta su amplia experiencia, solida cualificación y preparación para el trabajo, motivados por los valores corporativos soportados en el trabajo en equipo, la calidad, el respeto y la innovación (COMPAS, 2022). Esta calidad del equipo de trabajo se convierte en un pilar fundamental para articular el relacionamiento con los grupos e interés, que incluyen clientes interno y externos, donde se incluyen no los compañeros de trabajo sino también los proveedores, accionistas y hoy en día la comunidad.

La construcción de una visión y misión, compartida por todos los stakeholders de COMPAS, que da vida a los lineamientos económicos, sociales, ambientales, de protección y seguridad en el trabajo permite una proyección no solo positiva en términos de crecimiento sino sustentable y sostenible en sector económico en el cual desarrolla su actividad empresarial.

#### 4.1.2. Misión y visión

La visión compartida de futuro y la misión empresarial son dos de los grandes activos de COMPAS, que se identifican con esa identidad que promueven para promover la creación de valor y amplia cobertura.

La misión de COMPAS propone: “Generar valor al comercio exterior con soluciones logísticas integrales, eficientes, innovadoras y sostenibles a través de nuestra red de puertos multipropósito” en tanto que en su visión de futuro se compromete a “Consolidar a COMPAS para el año 2025, como la primera red portuaria y logística colombiana con presencia en América; duplicando el volumen de carga manejado en el 2020 y asegurando altos estándares de servicio, sostenibilidad y eficiencia” (COMPAS, 2022).

Como resultado de la ejecución de esta misión empresarial, se han alcanzado significativos resultados (COMPAS, 2022), donde se destacan los resultados en la gestión social, y el acompañamiento para el diseño y puesta en marcha de proyectos que redundan en beneficio de las comunidades aledañas al puerto (Figura 3).

#### Figura 3

*Resultados de gestión social año 2022*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor a partir de documento COMPAS (2022)

Estar adscritos al denominado "*Pacto Global Naciones Unidas*", demuestra que COMPAS se encuentra comprometido a trabajar para conseguir alinear su estrategia empresarial, de manera armónica y eficiente, con los diez principios en cuatro áreas temáticas, así:

- Derechos humanos,
- Estándares laborales,
- Medio ambiente y,
- Lucha contra la corrupción;

Además de estos aportes al pacto global, COMPAS enfoque sus esfuerzos para contribuir a la consecución de metas relacionadas con los Objetivos de Desarrollo del Milenio ODS, como se describe en otros apartes de este trabajo.

Todo este ejercicio empresarial es soportado por un sistema de gestión que cuenta con certificaciones como la ISO 14001/2015, que se somete anualmente a verificación por parte del Icontec, que se apoya transversalmente con un sistema de gestión ambiental que cuenta con procesos y procedimientos, controles, matrices de gestión de riesgo ambiental y otros elementos que interactúan con un sistema documental vía web denominado *Kawak*, que es un sistema que protege y resguarda los documentos soporte por cada área, y aplica todo el proceso del ciclo Planear, hacer, verificar y actuar- PHVA. Por último y como un ejercicio de responsabilidad social, se publican desde 2016 informes de sostenibilidad aplicando los estándares Global Reporting Initiative - GRI (COMPAS, 2022).

En años recientes, 2022, COMPAS procedió a materializar sus esfuerzos y construyó una estrategia de mitigación al cambio climático y ha alineado su estrategia ambiental a los ODS y ha mejorado sus procesos de economía circular, implementando procesos de recirculación de aguas y el desarrollo de un proyecto de eficiencia energética, cuyos resultados de referencia son, se evidencian la recolección de más de 15 mil metros cúbicos de aguas lluvias, recicle de más de 665 Toneladas de elementos, la donación de más de 1200 toneladas de residuos orgánicos, además de realizar campañas de concientización ambiental a todas las personas que trabajan

con COMPAS y así lograr resultados con el uso eficiente de recursos escasos como el agua y también a la clasificación de residuos, adema de aplicar principios de la economía circular.

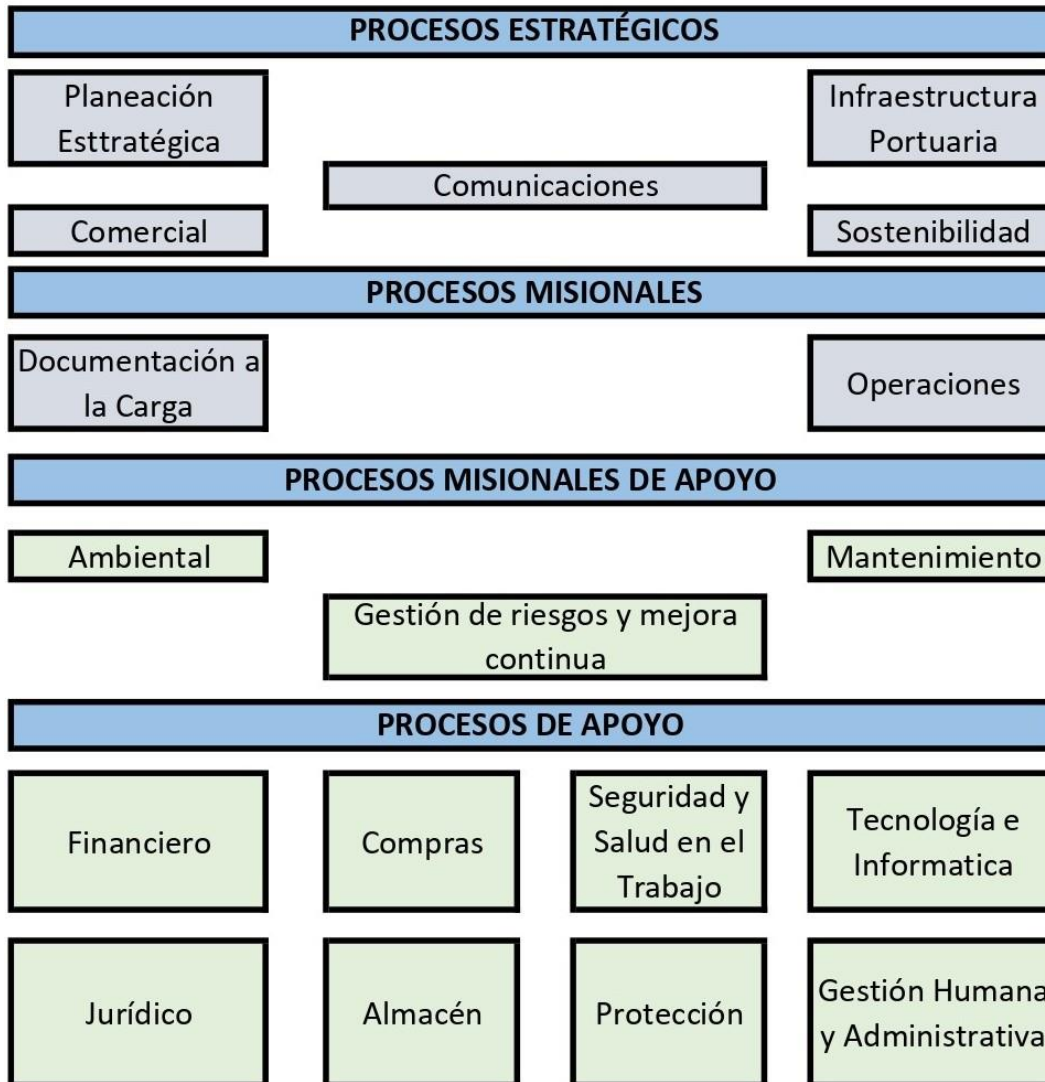
La obtención de reconocimientos en temas de conservación y cuidado del medio ambiente, es uno de los hitos de mayor relevancia en tiempos recientes para COMPAS, de tal manera que haber recibido la distinción por “Buenas Prácticas de Desarrollo Sostenible por el Pacto Global Red Colombiana”, en cumplimiento de los ODS, ganar en los años 2015 y 2019 el premio American Maritime Award y en el 2018 el Premio de Ingeniería por la construcción del puerto de COMPAS Aguadulce, ratifica ese compromiso.

#### **4.2. Estructura organizacional**

La estructura corporativa de COMPAS, para el desarrollo de su actividad económica en sus instalaciones portuarias se resume en cuatro procesos (Figura 4), así:

#### ***Figura 4***

*Mapa de procesos COMPAS*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor, a partir de mapa de procesos COMPAS (2022)

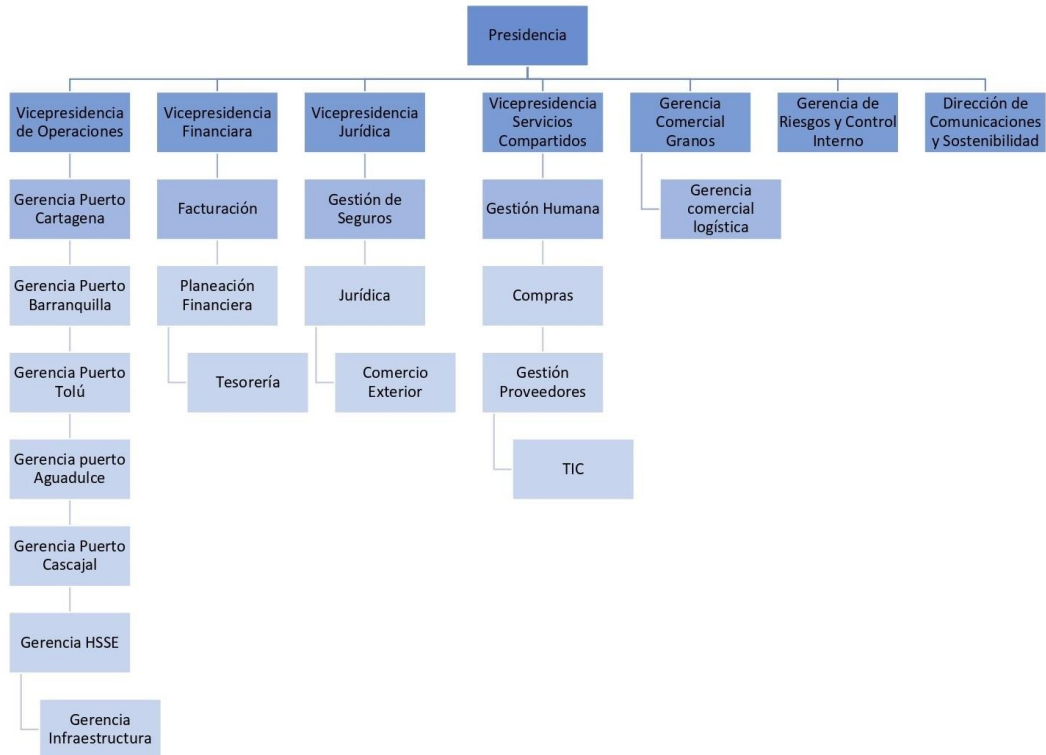
Los procesos de planeación estratégica, al interior de COMPAS promueve la construcción de objetivos y metas asociados a estrategia corporativa; en los procesos misionales se integran las actividades fundamentales de la razón de ser del negocio, es decir la operación de la carga y su documentación; de los procesos misionales de apoyo depende el funcionamiento de maquinaria y equipos necesarios para la operación, la gestión ambiental y el cumplimiento de instrumentos legales ambientales como licencias, permisos y planes de manejo ambiental.

Así mismo, los procesos de apoyo facilitan el funcionamiento de toda la estructura y aunque no hacen parte del proceso misional, son esenciales para poder llevar a cabo las actividades de

prestación de servicios portuarios en las terminales. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** representa el diagrama organizacional de COMPAS.

**Figura 5**

*Diagrama organizacional de COMPAS*



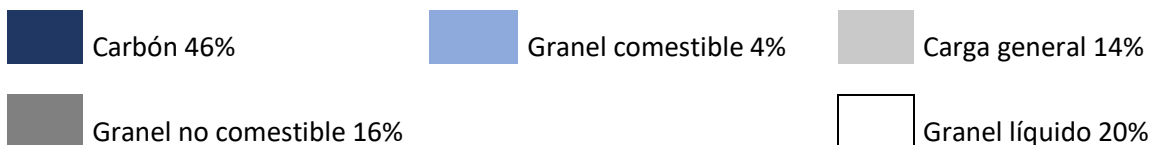
*Nota.* Fuente: Elaboración del autor, basado en la página web COMPAS - Equipo Directivo (2023)

### 4.3. Servicios ofertados

La operación en los puertos propone retos logísticos al talento humano de COMPAS, a través de la planeación estratégico dispone de opciones que permiten dar respuesta, con diferentes instalaciones ubicadas estratégicamente. Los clientes pueden disponer así de un lugar que les garantice una mejor solución a sus necesidades (COMPAS, 2023). Para 2022, fueron movilizadas 1´660.163 toneladas, lo que representa un incremento global del 18%, destacando el aumento significativo del granel comestible (672%), y el granel líquido (471%). En la siguiente figura 6 se presentan los tipos de carga que se han movilizado en los últimos años, así:

**Figura 6***Productos y/o servicios principales ofertados por COMPAS, Puerto de Barranquilla*

Tipo de carga	2020	2021	2022	Variación
<b>Carbón</b>	699.174	856.792	757.379	-12%
<b>Granel comestible</b>	13.318	9.454	73.004	<b>672%</b>
<b>Carga general</b>	267.712	264.628	239.375	-10%
<b>Granel no comestible</b>	47.107	218.033	261.340	20%
<b>Granel Líquido</b>	68.990	57.615	329.065	<b>471%</b>
<b>Total</b>	<b>1.096.301</b>	<b>1.406.522</b>	<b>1.660.163</b>	<b>18%</b>



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor, a partir de información de COMPAS (2022)

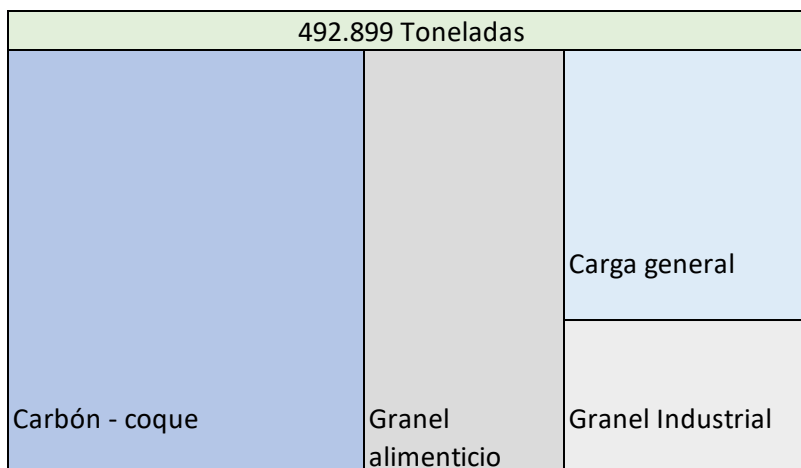
Además de los servicios de cargue y descargue, COMPAS está en capacidad de ofrecer los siguientes servicios de (COMPAS, 2023):

- a. Renta de facilidades: muelle y ante-muelle, áreas de almacenamiento.
- b. Equipos de izaje y transporte: como grúas y montacargas para muelle, cama baja y alta.
- c. Equipo humano experto en la supervisión y manejo de operaciones logísticas
- d. Manejo y disposición de residuos y sólidos tipo industriales, domiciliarios y peligrosos
- e. Limpieza de tanques en tierra y de embarcaciones especializadas
- f. Suministro y renta de contenedores especializados para la industria (CCU)
- g. Suministro de servicios de zona franca
- h. Suministros de misceláneos para cumplir la promesa de valor integral

Durante el primer semestre del año 2023, en las instalaciones de COMPAS S.A. sede Barranquilla se realizaron movilizaciones de cargue o descargue por 492.899 t de carga, que se distribuyen en un 48% en carga de coque carbón; 18% en carga general de acero; 22% en granel alimenticio de harina y maíz; y 12% granel industrial de yeso y fertilizantes (Figura 7).

**Figura 7**

*Distribución de la carga movilizada por cargue o descargue de motonave en el 2023-1*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor a partir de COMPAS (2023)

#### 4.4. Infraestructura del Puerto de Barranquilla

COMPAS Barranquilla es el primer terminal público, localizado en la desembocadura del río Magdalena. Cuenta con un sistema de cargue directo de carbón/coque a través de una banda encapsulada que asegura ambientalmente la operación, cumpliendo los estándares que define la normatividad colombiana. En la siguiente tabla se resumen los aspectos técnicos, los servicios y la infraestructura y maquinaria del puerto.

**Tabla 1.**

*Descripción técnica Puerto COMPAS de Barranquilla*

ITEM	DESCRIPCIÓN
Área total del terminal	24 hectáreas
Línea de atraque	800 metros
Posiciones de muelle	4
Calado operacional	10 metros
Resistencia del muelle	5 t / m <sup>2</sup> (consultar para cada proyecto)
Productos	Carga general, líquidos, carbón y coque, fertilizantes, granel alimenticio, carga de proyectos
Capacidad de movilización de toneladas anuales	3.000.000 t

*Nota.* Fuente: COMPAS (2023)

#### **4.4.1. Análisis territorial, operativo y organizacional del puerto COMPAS Barranquilla**

Capacidad instalada Puerto COMPAS Barranquilla:

- Área total construida
- Patios de carga General: 34.898,32 m<sup>2</sup>
- Áreas administrativas: 745,27 m<sup>2</sup>
- Silos: 226,20 m<sup>2</sup>
- Área de tanques de Hidrocarburo: 23.418,14 m<sup>2</sup>

Infraestructura y maquinaria Puerto de Barranquilla:

- Infraestructura para cargue directo a buque de carbón
- Tanques de almacenamiento de líquidos con capacidad total de 275000 barriles
- Capacidad de movilización de 3 millones de toneladas anuales
- Capacidad de almacenamiento en patios de carbón/coque: 150000 toneladas
- Conectado con las principales vías de la ciudad y el país
- Bodega cubierta con un área de 4350 m<sup>2</sup>
- Área de almacenamiento de 20 hectáreas
- 1 grúa Terex Fuchs MHL-360 D
- 1 cargador de barcos FAM (capacidad de 800 toneladas/hr)
- 4 cucharas graneleras de 12 m<sup>3</sup>
- 3 básculas camioneras certificadas
- 3 tolvas graneleras móviles (capacidad de 20 m<sup>3</sup> cada una)
- Banda transportadora encapsulada con cargador de buque
- Dispositivo Soft Loader

Patios de carbón:

- 12 hectáreas para el almacenamiento de carbón/coque
- Capacidad aproximada de 150.000 toneladas
- Sistema de riego especializado
- Operación bajo rigurosos estándares de control ambiental

#### **4.4.2. Canales de acceso**

El terminal de COMPAS Barranquilla no posee canal de acceso, se utiliza el canal público, la entrada al Puerto de Barranquilla está ubicada en la posición latitud, 11° 07´ N. y longitud 74° 51.5´ W. El puerto de Barranquilla se encuentra anunciado en la carta náutica 612 y el canal de acceso al Puerto está descrito en la carta de navegación COL 253 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) de la Dirección General Marítima (DIMAR).

El acceso al terminal se hace por el canal navegable del río Magdalena, la terminal se encuentra a 5,2 millas (alrededor de unos 9.5 km) al sur de Bocas de Ceniza sobre la margen occidental del río Magdalena.

#### **4.4.3. Áreas de maniobra y atraque**

COMPAS Barranquilla, está obligada a mantener la profundidad en su área de maniobra y sitios de amarre y atraque. El máximo de profundidad está alrededor de los 11m pero esto depende de las variaciones que tenga el río; igualmente debe informar a la Superintendencia de Puertos y Transporte, a la Dirección General Marítima, Cormagdalena y a los usuarios en general, el calado operacional de su área de maniobra y las variaciones que ocurran por los cambios en la profundidad.

#### **4.4.4. Parámetros constructivos**

La terminal Portuaria consta de cuatro (4) muelles marginales operativos numerados de forma ascendente de norte a sur con una longitud total de 788,01 ml y una longitud efectiva para atraque de buques de 753,45 ml.

Cada uno de los muelles cuenta con una longitud de 197 ml Estos muelles y sus accesos desde los patios están construidos en pavimento rígido por medio de concretos hidráulicos y pavimentos articulados tipo adoquín R12.

Todos los muelles marginales son estructuras lineales multipropósito, disponibles a mover y atender cargas especializadas en: graneles, cargas de proyectos, carga general, fertilizantes, combustibles y/o contenedores.

- El barco y/o unidad a flote de menor eslora que puede entrar a estos muelles son de 60 ml
- A estos muelles pueden llegar también barcazas de 40 ml de eslora
- Cota superior de las plataformas +2,55 msnm en todos los muelles

#### **4.4.4.1. Tipología constructiva.**

Muelle 1: Consta de 197 ml de longitud; a lo largo del mismo se disponen 27 ejes constructivos y sobre esta línea se ubican debajo de la viga cabezal 27 pilotes metálicos de Ø 610mm a una longitud total promedio de hincado de 29 ml y 61 pilotes totales distribuidos en al área del muelle. En este muelle se combina con una tablestaca hincada a 17 ml de profundidad desde el eje 1 al 7 en una longitud aproximada de 45,00 ml con cierre el eje 1 contra el muelle existente.

Muelle 2: Consta de 197 ml de longitud; a lo largo del mismo se disponen 21 ejes constructivos y sobre esta línea se ubican debajo de la viga cabezal 21 Pilotes metálicos de Ø 762mm a una longitud total promedio de hincado de 29 ml y 50 pilotes totales distribuidos en al área del muelle.

En ambos muelles sobre cada pilote se embona y arriostra un capitel adecuado estructuralmente para soportar las vigas y prelosas prefabricada sobre las que funde una placa topping en concreto rígido reforzado que hace de estructura de acabado o capa de rodadura en dicho muelle.

Muelles 3 y 4: Se encuentran contruidos sobre una estructura de pavimento articulado (adoquín estructural de 5 Mpa), la cimentación de este capa de rodadura consta de 90 cm de material granular seleccionado compactado a capas de acuerdo a la norma INVIAS alcanzando resistencias que superan el 95% del proctor modificado y apoyado sobre una estructura de cimentación profunda construida por pilotes e inclusiones de concreto armado; entre la estructura de cimentación y el pavimento se construyó una capa de 30 cm de concreto compactado con

rodillo (CCR) el cual presenta una combinación de material granular + cemento gris tipo 1 portland.

Los adoquines fueron instalados en forma de “espina de pescado” y arriostrados con vigas de confinamiento, así mismo toda la estructura de los muelles se rigidizo a lo largo de los mismos con líneas de tensores desde la viga cabezal a la viga de retención en tierra.

#### **4.4.5. Ayudas a la navegación**

El servicio de faros y boyas en los litorales y el de señalización de los canales públicos navegables en los puertos públicos, está a cargo y bajo la responsabilidad de la DIMAR. COMPAS Barranquilla, dentro de su área concesionada no cuenta con ningún tipo de ayudas a la navegación debido a las cercanías que se tienen con el canal de acceso principal al puerto y por contar este con boyas, faros y luces de enfilación que facilitan el acceso a la terminal.

#### **4.4.6. Áreas de fondeo**

COMPAS Barranquilla no posee áreas de fondeo, por tal motivo las motonaves utilizaran el área de fondeo pública denominada como área de fondeo DELTA cuyas coordenadas están incluidas en la carta de navegación COL-253. y/o las que la autoridad marítima designe.

#### **4.4.7. Calado operacional**

El calado operacional y el margen de seguridad, así como las restricciones y condiciones de maniobra en las diferentes áreas del Río Magdalena son anunciados por la DIMAR a través de la capitanía de puerto de Barranquilla en los mensajes de seguridad.

COMPAS Barranquilla no tiene canal de acceso interno o privado, la terminal opera con el canal público del puerto de barranquilla el cual esta adyacente a las zonas de maniobra concesionadas.

#### **4.4.8. Accesos vehiculares, férreos y peatonales**

COMPAS Barranquilla está comunicada, por vía terrestre, con el interior del país por las carreteras troncales de oriente, occidente y la troncal del Caribe que lo comunica con las ciudades Cartagena y Santa Marta.

Por vía fluvial se comunica con los puertos del río Magdalena y con Cartagena través del Canal del Dique.

El Acceso por vía marítima se hace a través del canal de acceso al puerto de Barranquilla ingresando desde el mar Caribe por Bocas de Ceniza hasta recorrer una distancia aproximada de 9.5 km navegando por el Río Magdalena. Finalmente, no cuenta con acceso férreo.

## 5. MARCO DE REFERENCIA

### 5.1. Análisis del sector portuario

El transporte marítimo de bienes y la logística necesaria para llevarlas de su origen a su destino desempeñan un papel crucial en el comercio global, movilizando aproximadamente el 84% de los insumos y mercancías a nivel mundial a través de operadores portuarios. Esta tendencia se refleja de manera similar en América Latina y el Caribe, especialmente en los países de América del Sur, que contribuyen alrededor del 17% del total mundial de cargas marítimas (Sánchez, 2021).

Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), los diez países que más aportan el 81% al volumen total de carga operado en la región son México, Chile, Perú, Colombia, Panamá, Ecuador, Argentina, Brasil, Jamaica y República Dominicana. La actividad portuaria se revela como esencial para asegurar la distribución de las cadenas de suministro, incluyendo bienes vitales como alimentos y medicamentos (CEPAL, 2020).

Aunque el comercio internacional transportado por agua experimentó un crecimiento leve del 0.4% en 2019, alcanzando un récord histórico de 11.860 millones de toneladas métricas, la pandemia de COVID-19 generó una caída del 17,7% en el comercio mundial de bienes en comparación con 2019, afectando especialmente a América Latina y el Caribe con contracciones del 26,1% y 27,4% en exportaciones e importaciones respectivamente en los primeros cinco meses de 2020 (Sánchez, 2021).

En 2021, con la recuperación del comercio y la producción mundial, América Latina mostró signos positivos en el manejo de contenedores, alcanzando un 2.5% por encima de los niveles prepandemia, mientras que a nivel internacional hubo una recuperación del 3,2%, totalizando 11.000 millones de toneladas según el Informe del transporte marítimo 2022 de UNCTAD. No

obstante, estas cifras aún no superan los indicadores prepandémicos y enfrentan desafíos como conflictos internacionales, cierres de puertos, inflación, huelgas y eventos climáticos (Naciones Unidas, 2022).

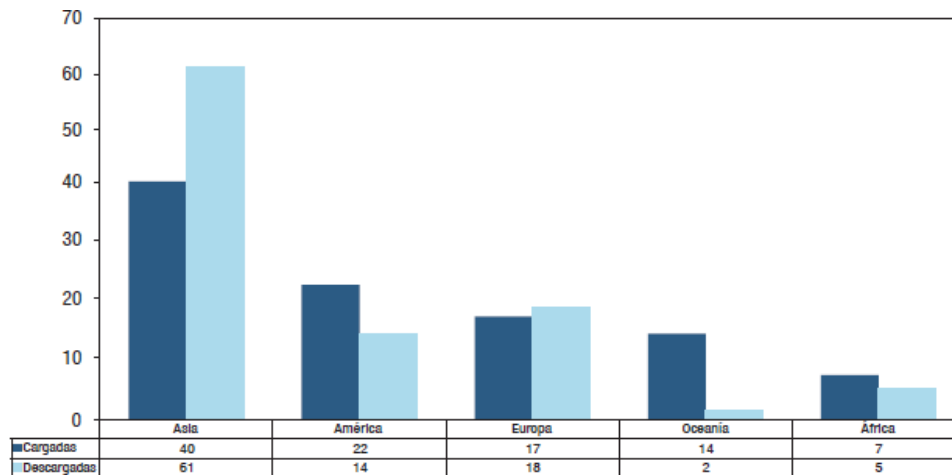
Las previsiones de la UNCTAD para el periodo 2023-2027 indican un crecimiento anual compuesto del comercio marítimo del 2,1%, un ritmo menor al promedio del 3,3% de los últimos treinta años. En el caso de Colombia, a pesar de una disminución del 2,1% en la cantidad de carga movilizada en 2022, se espera un aumento para 2023 debido a incentivos como la reducción del flete de transporte marítimo, aunque esto dependerá de factores externos como la tasa de cambio y la coyuntura internacional (SUPERTRANSPORTE, 2023).

La actividad portuaria en Colombia se revela como un componente fundamental de la cadena logística y del comercio exterior, ya que, según la CEPAL, cada peso generado por las instalaciones portuarias en el país se traduce en tres pesos adicionales en la economía nacional a través de encadenamientos. Aproximadamente el 90% del comercio exterior de Colombia y alrededor del 25% de su Producto Interno Bruto (PIB) se llevan a cabo utilizando instalaciones portuarias (ANDI, 2021). En 2008, más del 80% del comercio mundial de carga, que representa más de ocho mil millones de toneladas, fue facilitado por barcos (Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo, 2009).

La participación de las economías en desarrollo de países como África, Asia, China, India, Asia occidental, en el comercio marítimo mundial ha incrementado al convertirse en una fuente de procesos globalizados de fabricación, más allá del abastecimiento de materias primas y energía de combustibles fósiles (UNCTAD, 2017). Para el año 2016, en términos de influencia geográfica, Asia es la principal zona de carga y descarga, seguida por las Américas (Figura 8). Por lo anterior, la estrecha relación entre el crecimiento económico de las regiones y sus capacidades comerciales redundan en la actividad de los puertos marítimos, representando el 80% de la gestión de comercio mundial.

**Figura 8**

*Comercio marítimo mundial por regiones, 2016. (En % del tonelaje mundial)*



Nota. Fuente: UNCTAD (2017)

Sin embargo, bajo los cambios económicos, institucionales, reglamentarios y operativos, los puertos, como nodos clave de las cadenas mundiales de transporte deben alcanzar un mayor rendimiento, optimización de operaciones, reducción de costos, eficiencia en los tiempos y fomento del comercio. A esto se suma, el cambio climático y otros criterios de eficiencia en cuanto a la seguridad, la conservación de recursos, la protección ambiental y la responsabilidad social en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (UNCTAD, 2017).

En cuanto a la definición de los puertos, pueden considerarse una infraestructura de desarrollo económico superando el tradicional concepto de “*interfaz entre mar y tierra*”, dada la proporción de procesos logísticos, servicios para la industria, el comercio, las finanzas y la producción (Y. C. Yang & Ge, 2020).

En vista de su ubicación geográfica en zonas costeras, los puertos marítimos pueden verse afectados por el aumento del nivel del mar, el aumento de las condiciones meteorológicas extremas, el aumento e intensidad de tormentas tropicales y tifones, aumento de la altura de las olas que superan los niveles de diseño de los rompeolas, aumento de las precipitaciones, exceso de la capacidad de drenaje de los pozos de los muelles, aumento de la temperatura del océano y deterioro de la calidad del agua del puerto (Arafeh-Dalmau et al., 2023; K.Y. Ng et al., 2013; Xia &

Lindsey, 2021; Y. C. Yang & Ge, 2020) y; en los puertos fluviales, los ríos son susceptibles a inundaciones o sequías (Baubekova et al., 2024; Gobert, 2023).

Ante los desastres naturales consecuencia del cambio climático, se han identificado algunos impactos determinantes en la operatividad portuaria: a) Infraestructura dañada, incluido edificios, muelles y sedimentación, b) Equipos y tecnología inservible, c) Sistema de transporte externo bloqueado y d) Suspensión de los viajes y cierre de la ruta (Y. C. Yang & Ge, 2020).

Por ello, algunos autores han considerado evaluar los impactos del cambio climático en los puertos a partir de los siguientes tipos de estudio:

### **5.1.2. El clima y el cambio climático**

La climatología terrestre se encuentra determinada por la dinámica térmica de los gases y el agua en la baja atmósfera, resultado de la interacción entre los elementos del sistema climático: atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biosfera (IPCC, 2021). El clima, entendido como el comportamiento promedio y estadístico de variables meteorológicas como temperatura atmosférica, precipitación pluviométrica y vientos en periodos que abarcan desde décadas hasta millones de años en una región (WMO, 1992), se ve influenciado por fenómenos climáticos que responden a procesos convectivos, cambios de presión y temperatura, generados por la interacción de los gases del sistema climático, incluyendo los gases de efecto invernadero (GEI) como CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> (Pallmall, 2021).

La circulación cíclica del agua, fundamental para el clima, es el resultado de procesos como el calentamiento, expansión, ascenso y enfriamiento de los gases en la atmósfera, donde los GEI desempeñan un papel crucial al permitir la contención y regulación del calor desde la radiación solar y el vulcanismo a lo largo de la historia geológica de la Tierra (Pallmall, 2021).

La Variabilidad Climática engloba alteraciones en el estado medio y otras características estadísticas del clima en escalas espaciales y temporales más extensas que los fenómenos

meteorológicos, y puede ser resultado tanto de procesos naturales como de la intervención humana (IPCC, 2021). En cuanto al cambio climático, el IPCC (2021) lo define como la modificación identificable del estado del clima que perdura a lo largo de períodos extensos, superando umbrales establecidos, ya sea por causas naturales y/o influencias externas (antropogénicas), evaluadas en escalas que abarcan desde décadas hasta milenios.

### **5.1.3. Calentamiento global**

El Calentamiento Global, según el IPCC (2021), se refiere al aumento estimado de la temperatura media global en superficie durante un período de 30 años, expresado en relación con los niveles preindustriales, tomados como referencia al periodo 1850-1900.

Estudios sobre la temperatura global de los últimos mil años indican que la temperatura media de la Tierra se mantuvo alrededor de 14°C hasta el siglo XIX, a partir del cual experimentó un aumento progresivo e inusual. La concentración elevada de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera se identifica como el factor principal que ha influido en la variabilidad climática y el calentamiento global desde el siglo XX. Varios autores sostienen que las actividades humanas son la principal fuente de estos GEI, contribuyendo así a su concentración atmosférica y al agravamiento del efecto invernadero (Pallmall, 2021; IPCC & Masson-Delmotte, 2021). La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (FCCC) utiliza el año 1750 como referencia para medir las concentraciones de GEI (2022).

El aumento de las concentraciones de GEI de origen antropogénico se considera la principal causa del calentamiento global desde la Revolución Industrial (FCCC, 2022). Este calentamiento ha desencadenado modificaciones en el ciclo hidrológico, evidenciadas en un aumento en la intensidad de lluvias y nevadas, la prolongación de sequías, la retracción de glaciares y casquetes polares, una disminución en los periodos de congelamiento estacionales, un incremento en el nivel del mar, cambios en el régimen de vientos y un aumento en la

frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos y fenómenos climáticos como el fenómeno del Niño y La Niña (IPCC, 2007).

Actualmente el incremento en la temperatura del planeta es de aproximadamente  $1,15 \pm 0,13$  °C, siendo los años entre 2015 y 2022 los más cálidos que se tenga registro (FCCC, 2022). Existe la probabilidad de que la temperatura alcance los  $1,5^{\circ}\text{C}$  para el periodo entre 2030 y 2052 si el aumento actual persiste (IPCC, 2022). En cuanto al nivel medio del mar, se calcula un aumento de alrededor de  $3,4 \pm 0,3$  mm/año en los últimos 30 años (1993-2022), con un aumento en la última década a  $4,4$  mm/año, atribuido principalmente a la expansión térmica debido al aumento de la temperatura del agua en los océanos y al aumento de la cantidad de agua por el derretimiento de hielo en los polos (FCCC, 2022; IPCC, 2007).

Cuando la temperatura del agua marina supera los  $26$  °C, se observa un aumento en la presencia de vapor de agua en la troposfera inferior y en la energía estática húmeda que sustenta la convección y las ráfagas de viento, atenuando la formación de depresiones y tormentas tropicales, huracanes y tifones. Aunque la frecuencia de estos acontecimientos meteorológicos intensos varía anualmente, los datos sugieren un aumento importante en intensidad y duración desde los años 70.

## **5.2. Barranquilla, área de estudio**

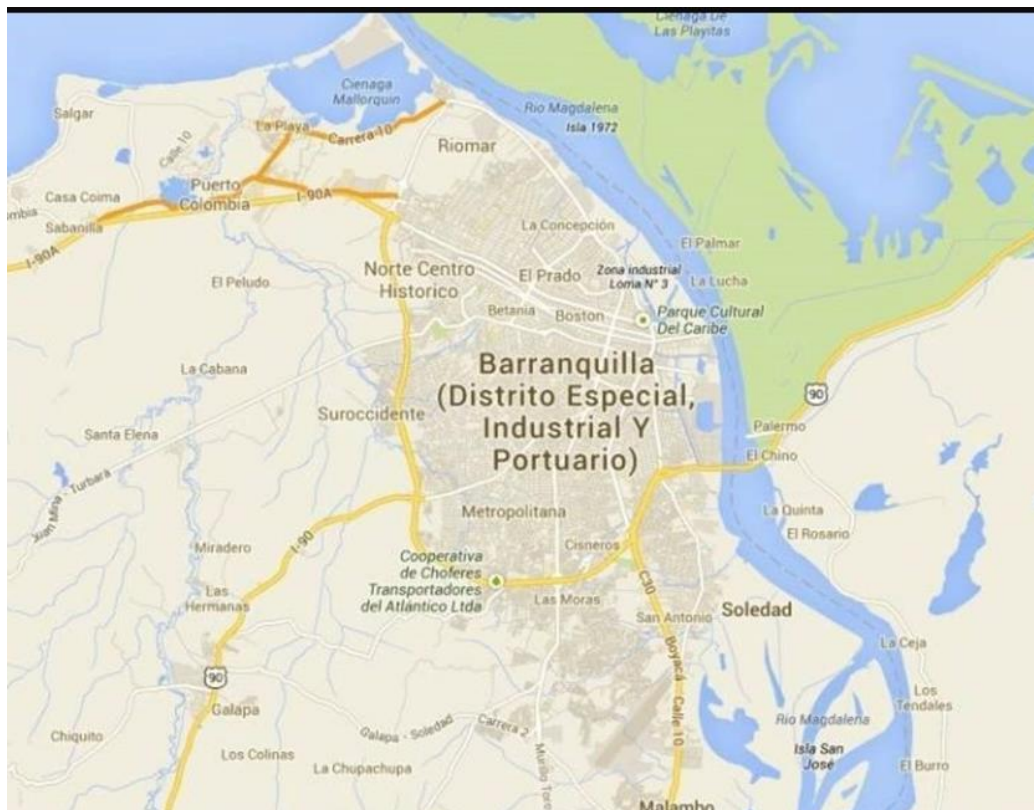
La Ciudad de Barranquilla, se encuentra ubicada en la zona nororiental del Departamento de Atlántico, Colombia, posee una latitud de  $10^{\circ} 59' 16$  al norte y una longitud de  $74^{\circ} 47' 20$  en el occidente. Por el oriente limita con el Río Magdalena, por el norte con el Mar Caribe, por el sur con los municipios de Galapa y Soledad y por el occidente con Puerto Colombia (Figura 9). Esta gran ciudad cuenta con una población de alrededor de 1.334.509 habitantes, es un importante centro económico y cultural de 166 kilómetros cuadrados (Terridata, 2023).

Barranquilla es un importante centro económico, con un enfoque significativo en el comercio, la industria y los servicios. Su puerto es crucial para la importación y exportación de bienes, y la ciudad alberga diversas empresas en sectores como el petróleo, la energía y la manufactura. La ciudad y los municipios aledaños de Puerto Colombia, Galapa, Soledad y Malambo integran el Distrito Especial, Industrial y Portuario de Barranquilla desde 1993.

Son cuatro sectores productivos por los que se destaca la ciudad: la industria, los servicios, el comercio y el transporte. En la actividad industrial sobresalen la industria manufacturera y metalmeccánica, la producción de alimentos y bebidas, las confecciones y las sustancias químicas.

### Figura 9

*Mapa de la ciudad de Barranquilla, Atlántico - Colombia*



Nota. Fuente: Tomado de Mapade, 2023

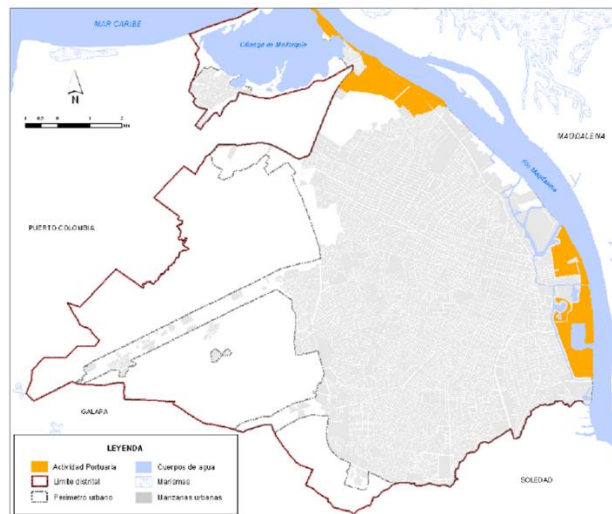
El sistema portuario colombiano es fundamental para impulsar la economía e internacionalización de su comercio, por esa razón a través del CONPES 4118 del 2023 se busca actualizar la política portuaria del país para adaptarse al entorno global y local, teniendo muy presente la sostenibilidad de sus procesos (DNP, 2023).

El CONPES realiza un diagnóstico frente a la ineficiencia del sector donde reúnen los problemas en seis (6) grupos, en los que se encuentra la *desarticulación del crecimiento del sistema portuario con los instrumentos de planificación territorial y las condiciones físicas y ambientales de la costa*.

Sin embargo, se encuentran diferentes actos administrativos que hacen esfuerzos individuales por guiar la política del sector. Por ejemplo, por medio del Decreto No.0212 de 2014 se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Especial, Industrial Y Portuario de Barranquilla 2012-2032. En él se determina el área de actividad portuaria (Figura 10), que se encuentra constituida y relacionada con la utilización de la ribera occidental del Río Magdalena, hasta su desembocadura (Alcaldía de Barranquilla, 2023).

### Figura 10

*Asignación en el POT de área de actividad portuaria del Distrito*



*Nota.* Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito especial, industrial y portuario de Barranquilla

Igualmente, en el POT se determinan operaciones estratégicas por zonas de la ciudad. La Operación Estratégica Ribera del Río Magdalena, se divide en 5 subzonas en la que se ubica la Subzona Portuaria la cual corresponde a los sitios donde se encuentra los puertos y se robustecen toda la industria logística y de transporte fluvial. Este instrumento de planificación también determina los Planes Maestros en los que se encuentra el Plan Maestro Portuario proyectado hasta el 2030, ayudará a través de proyectos y determinando fuentes de financiación a la expansión y consolidación de los usos portuarios y sus complementarios, en especial, logística y transporte desde el km 22 hasta la desembocadura del río. (Alcaldía de Barranquilla, 2023). Una de sus prioridades es asegurar la inversión y ejecución del proceso de adecuación de la Zona Marítima Portuaria y sus obras complementarias: dragado, rompeolas de protección, intervención de la playa de Puerto Mocho, recuperación integral de la ciénaga de mallorquín, y vía terrestre de acceso.

En el Plan de Desarrollo Municipal “Soy Barranquilla” 2020 – 2023, en su programa Conexiones Regionales presenta el proyecto “Zona Portuaria Marítima” que busca a través de la meta del cuatrienio mejorar en un 60% las vías terrestres de acceso por un valor de \$584.000.000 (Alcaldía de Barranquilla, 2023).

Plan de Ordenamiento y Manejo de la cuenca Hidrográfica del Río Magdalena en el Departamento del Atlántico de 2007, donde se presenta la contaminación a causa de los vertimientos de aguas industriales sin ningún tipo de tratamiento por parte de las industrias localizadas en los municipios de Malambo, Soledad y Barranquilla, por lo cual el sistema cenagoso de Malambo es uno de los más contaminados. Sin embargo, durante todo el documento presenta a la ciudad de Barranquilla como una de las más responsables en saneamiento básico y manejo de residuos sólidos. Por otro lado trata el tema de acoplamiento a la hidrodinámica de los humedales desde lo ambiental y ecológico. Nombra el proyecto del dique guía y el dragado para la obtención de mayor profundidad cambiaría de gran manera las condiciones fluviales y generaría para la franja de humedales mayores riesgos de alteración.

Conforme a los principios establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, la política portuaria debe considerar los modelos de ocupación de las áreas urbanas que poseen zonas portuarias tanto marítimas como fluviales. Se hace necesario coordinar los instrumentos de planificación del territorio con posibles expansiones, nuevas áreas destinadas a la infraestructura portuaria y mejoras en los accesos a los terminales portuarios. En este ámbito, se plantea la necesidad de actualizar los instrumentos técnicos que influyen en la planificación física y ambiental de los entornos portuarios, con el objetivo de garantizar la coherencia entre los instrumentos de planificación y reconocer la influencia determinante de los puertos en el ordenamiento de los territorios en los que se ubican.

### **5.3. Cambio climático y la afectación en zona portuaria de Barranquilla**

El cambio climático en la región del Caribe y más específicamente en Barranquilla, presenta una serie de impactos notables que afectan tanto al medio ambiente como a las comunidades locales. A continuación, se presenta un análisis general de algunos de estos aspectos:

El efecto de cuña marina, por ejemplo, ha provocado la intrusión salina en los acuíferos locales como ciénagas y parques naturales, además de afectaciones en redes de drenaje en zonas cercanas a Bocas de Ceniza.

Se han intensificado los fuertes vientos y tormentas eléctricas, los cuales afectan viviendas, estructuras, edificaciones en la zona costera de la ciudad. En el lapso de variabilidad climática por efecto del fenómeno de La Niña, que ocurrió entre 2010 y 2011, los cuerpos de agua alcanzaron niveles máximos, resultando en inundaciones para las comunidades establecidas en cercanías a cuerpos de agua de la zona. Esto conllevó a la consiguiente pérdida de cultivos, áreas de pastoreo y animales destinados a las actividades pecuarias (IDEAM, 2022)

## **5.4 Evaluación de la vulnerabilidad frente al cambio climático**

El fenómeno del cambio climático representa uno de los retos más significativos para la industria portuaria a nivel global, con especial relevancia en la región del Caribe colombiano. La evaluación de la vulnerabilidad del sector portuario en esta área demanda la aplicación de metodologías establecidas desde la nación, adaptadas a las necesidades particulares derivadas de la ubicación geográfica de la infraestructura, la importancia de las operaciones, el volumen de carga y el personal que labora en los puertos.

Según lo establecido en la norma NTC-ISO 14091, el informe AR6 del IPCC define la vulnerabilidad como la medida en que un sistema es susceptible y no posee la capacidad de enfrentar los impactos dañinos del cambio climático, abarcando la variabilidad y situaciones extremas en términos de tipo, magnitud e intensidad, así como el ritmo de cambio meteorológico al que se muestra un sistema o ecosistema evaluado en relación con su sensibilidad y capacidad de adaptación (ICONTEC, 2021).

### ***5.4.1 Componentes de la evaluación de la vulnerabilidad***

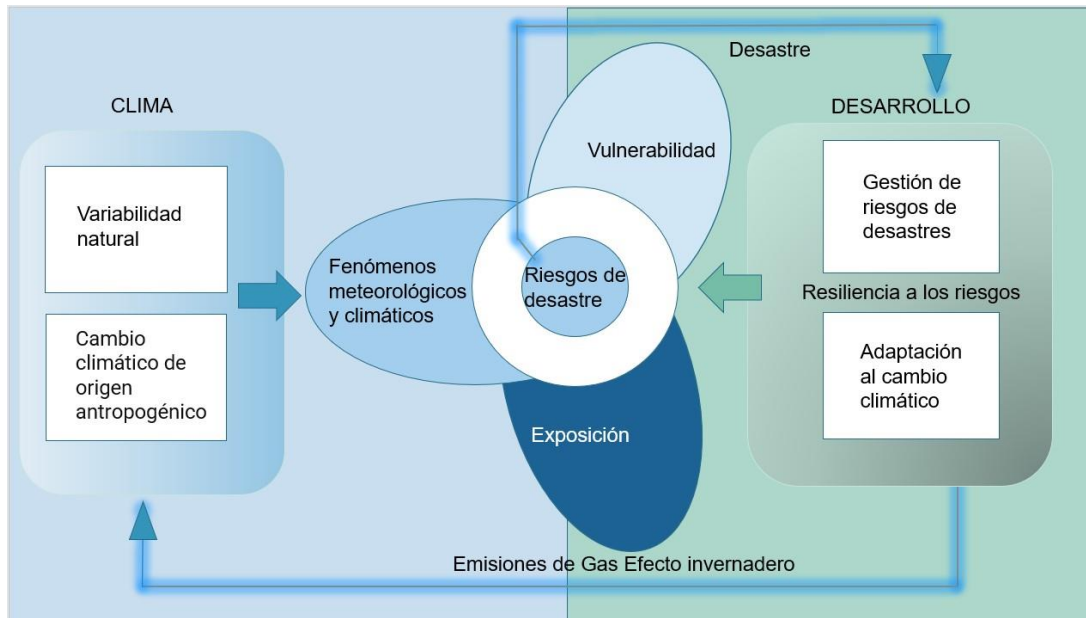
De manera general, la evaluación de la vulnerabilidad permite comprender las relaciones causa/efecto relacionadas al cambio climático y su impacto en las personas, sectores económicos y los sistemas socio ecológicos.

En este sentido, la vulnerabilidad al cambio climático es una función compleja que conjuga la interacción de diferentes variables que determinan que tan susceptible es un sistema respecto a las condiciones meteorológicas, por lo que no existe una regla estricta que establezca una cuantificación, por lo cual se aborda una evaluación de la vulnerabilidad y no una medición.

El plan de gestión del cambio climático para los puertos marítimos de Colombia se muestra en la figura 11.

**Figura 11**

*Conceptos claves para la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor, basado en Reporte de IPCC “*Gestión de los Riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático, 2012*”.

#### **5.4.1.1. Amenaza.**

De acuerdo con la información de la Tercera Comunicación sobre el Cambio Climático se espera un aumento en la temperatura media de 2,14°C para el año 2100, esta condición sumada a los fenómenos de El Niño y La Niña pueden desatar eventos meteorológicos extremos que pueden considerarse una amenaza para el sector portuario de la costa caribe colombiana para el futuro a corto y mediano plazo.

La infraestructura portuaria de Colombia se enfrenta a diversas amenazas relacionadas con la variabilidad del clima y el cambio climático. Los análisis indican que las tormentas, las inundaciones por lluvia, procesos erosivos y elevación súbita del nivel del mar y río son los fenómenos más frecuentes en las regiones costeras. Bolívar registra el mayor número de incidentes. Resume reportes de amenaza en los departamentos costeros.

Las amenazas que han tenido mayor incidencia en los departamentos costeros de Colombia se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Amenazas asociadas al cambio climático reportadas en departamentos costeros*

Departamentos costeros Amenazas	Atlántico	Antioquia	Bolívar	Cauca	Córdoba	Chocó	Guajira	Magdalena	Nariño	San Andrés	Sucre	V. del Cauca	Total
Vendaval	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10
Inundación	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10
Erosión	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10
Mar de Leva	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	9
Tormenta eléctrica	x	x	x			x	x	x	x	x			8
Sismo	x	x	x	x		x	x	x		x		x	9
Sequía			x				x	x		x			4
Variación del nivel del mar		x	x			x							3

*Nota.* Fuente: Elaborado y modificado por el autor según informe del Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016).

Así mismo, los reportes indican que el fenómeno de La Niña 2010-2011 afectó la zona portuaria ocasionando pérdidas cercanas a 45 mil millones de pesos; por otra parte, en el puerto de Barranquilla la sedimentación del río Magdalena provocó cierres en terminales, represamiento de bienes, desvío de motonaves ocasionando importantes sobrecostos.

Entre las amenazas más representativas se reporta:

1. Variación nivel del río: De acuerdo con la Organización de los Estados Americanos - Manual para el Diseño e Implementación de un Sistema de Unidad de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, la medición de la lluvia y del nivel de agua de los ríos tiene por objetivo hacer un seguimiento a las condiciones hidrológicas que pueden producir una inundación.
2. Sedimentación por Erosión/socavación de márgenes del puerto: De acuerdo con la publicación de Vargas (2012), la alta sedimentación generada por la hidrodinámica del Río Magdalena en el

área de Barranquilla teniendo en cuenta que se encuentra ubicada en un delta y, en conjunto con las corrientes costeras que se dirigen hacia el suroeste, producen concentraciones de arenas marinas y costeras, lo cual está acabando con las playas del sector.

3. Inundación por lluvia (pluvial): Según el informe de gestión de Compas 2022, se describen Inundaciones de zonas de carga y la Afectación de infraestructura portuaria, como resultado de las inundaciones. De acuerdo con estudios realizados por el PNUD, citado por Ramírez et al.; 2017, una de las zonas más afectadas del país con inundaciones es la ciudad de Barranquilla, ubicado en la región caribe del país.

4. Vendaval (ráfagas de viento): El aumento de la temperatura marina por encima de los 26 °C va generalmente acompañado de un aumento del vapor de agua en la troposfera inferior y de energía estática húmeda que alimenta la convección y ráfagas de viento, propiciando la formación de depresiones y tormentas tropicales, huracanes y tifones. La frecuencia de estos eventos meteorológicos extremos varía considerablemente de un año a otro, pero los datos indican aumento sustancial en intensidad y duración desde la década de 1970.

5. Ola de calor (Altas temperaturas / radiación solar): Según el informe de gestión de Compas 2022, el incremento en la temperatura puede generar un aumento en el consumo de energía por uso de aires acondicionados y control de temperatura de contenedores refrigerados. Además, la evaluación de los peligros del estrés térmico por calor en el entorno laboral, relacionado con el calentamiento global (Moreno, 2023)

#### **5.4.1.2. Exposición.**

Esta variable, representa la presencia de personas, medios de subsistencia, especies o ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2014).

Se determina con la probabilidad de ocurrencia (PO) que pueda tener una amenaza.

#### **5.4.1.3. Sensibilidad**

La sensibilidad determina la estimación de la afectación de un sistema adversa o beneficiosamente ante un determinado suceso relacionado con las condiciones meteorológicas presentes. La sensibilidad suele determinarse en términos de las condiciones físicas o naturales del sistema como ubicación geográfica, diseño y construcción estructural, condiciones de los sistemas de drenaje y el terreno, así como de los ecosistemas inmersos.

#### **5.4.1.4. Impacto Potencial**

El impacto potencial del cambio climático se determina con un análisis entre la relación de la exposición y sensibilidad. Estos impactos a su vez pueden desencadenar impactos indirectos derivados afectando no solamente la esfera física, ecosistema y económica sino también a la social.

#### **5.4.1.5. Capacidad Adaptativa**

El AR6 del IPCC (2022) describe el concepto de capacidad de adaptativa como "la capacidad de un sistema para adaptarse al cambio climático (incluidas la variabilidad climática y los extremos) para moderar daños potenciales para aprovechar oportunidades y hacer frente a las consecuencias".

Por otra parte, el término *adaptación* se refiere a la habilidad o capacidad de un sistema para modificar o cambiar sus características o comportamientos para afrontar mejor las tensiones externas existentes o previstas (Brooks, 2003). Por consiguiente, la adaptación permite que un sistema reduzca el riesgo asociado con dichos peligros.

Se pueden identificar tres categorías amplias de peligro (Brooks, 2003):

*Categoría 1:* Peligros recurrentes discretos, como en el caso de fenómenos transitorios como tormentas y sequías; y eventos de lluvias extremas.

*Categoría 2:* Peligros continuos, por ejemplo aumento de las temperaturas medias o descensos de las temperaturas medias; lluvias que ocurren durante muchos años o décadas (como las de efecto invernadero antropogénico); calentamiento o desecación.

*Categoría 3:* Peligros singulares discretos, por ejemplo cambios en los regímenes climáticos asociados con cambios en la circulación oceánica.

Por lo tanto, es necesario que las organizaciones trabajen en su capacidad adaptativa puesto que esta no ocurre instantáneamente, sino que el sistema requiere de tiempo para prepararse anticipadamente a un desastre. En este sentido, las estrategias pueden ser de mitigación (reaccionarias) o estrategias de adaptación (prevención) (Y. C. Yang & Ge, 2020).

Para Brooks *et al.*, (2003) los factores que determinan si se produce o no la adaptación dependen de diversas escalas y de cómo se defina el “sistema” que se está evaluando. Así pues, se pueden caracterizar escalas espaciales o escalas de interacción entre individuos, grupos o instituciones y su interacción entre sí, por ejemplo: vínculos entre la escala local y nacional; la intervención en el mercado a nivel nacional o internacional que afecta el precio de un bien.

Además, sugieren los siguientes cuestionamientos para garantizar cohesión entre la vulnerabilidad real y los sistemas de evaluación: ¿Qué preocupa principalmente: la vulnerabilidad biofísica o social?, ¿cuáles son los principales peligros que nos preocupan y cómo afectan a la adaptación?, ¿Está definida la capacidad adaptativa únicamente a nivel de sistema y subsistema, o se incluyen los factores “exógenos” que facilitan o inhiben la realización de la capacidad del subsistema?(Brooks, 2003).

Por su parte, Yang *et al.* (2020), sugieren que las estrategias frente al cambio climático en los puertos deben ser de tipo adaptativo y comprender: a) determinación de una visión a largo plazo, (2) desarrollo de una estrategia de seguimiento, (3) seguimiento y registro de resultados, (4) revisión del progreso y las acciones de implementación, (5) reevaluación y atención a las políticas y acciones de mantenimiento.

#### 5.4.1.6. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad, para nuestro caso, será entendida como la predisposición dentro del sistema portuario a sufrir un daño directo o posterior a un peligro. Su análisis debe integrar características como tipo de exposición, sensibilidad y resiliencia (Y. C. Yang & Ge, 2020).

Aunque principalmente las evaluaciones de vulnerabilidad portuaria se han concentrado en el aumento del nivel del mar (SLR) y su impacto en las comunidades costeras (Nicholls et al., 2011), también se han abordado sus efectos en las playas (p. ej. Revell et al., 2011; Sánchez-Arcilla et al., 2011; Monioudi et al., 2016), estructuras de defensa costera (p. ej., Isobe, 2013; Lee et al., 2013; Burcharth et al., 2014), ecosistemas costeros (p. ej., Anon, 2012; Kane et al., 2015), o las inundaciones de zonas urbanas (p. ej. Hallegatte et al., 2011; Paudel et al., 2015).

De acuerdo con Yang y Ge (2020), los pasos a seguir para un análisis sistemático de vulnerabilidades asociadas al cambio climático corresponden a:

- 1) Evaluar las tendencias y riesgos pasado y presentes
- 2) Evaluar la exposición futura a desastres climáticos
- 3) Hacer un análisis de sensibilidad respecto al cambio climático futuro (de alto a bajo)
- 4) Determinar las capacidades de adaptación al cambio climático
- 5) Realizar una evaluación de vulnerabilidades

Entre los elementos determinantes para el análisis, se debe incluir la presencia, adecuada o ausencia de medios de transporte alternos, la resiliencia de las autoridades y la gestión estatutaria, así como la compensación por daños por lluvia intensa o marea alta (completa a deficiente) (Y. C. Yang y Ge, 2020). Por otro lado, Hsieh *et al.* (2014) sugirieron a partir de su estudio de cuatro puertos comerciales en Taiwán, los siguientes factores de evaluación: sistemas de transporte interior, tiempo de tránsito, densidad de la ruta de envío, capacidad de soporte de las instalaciones, productividad portuaria, conectividad, tiempo de respuesta, tasa de utilización de los muelles, productividad laboral, crecimiento de la inversión, volumen de tráfico de libre comercio, suministro de energía eléctrica y suministro de gas.

Sin embargo, no se dispone de una metodología universal generalizada para medir la vulnerabilidad debido a los complejos factores que dependen de los atributos espaciotemporales de las amenazas y los constructos sociales, económicos, políticos y culturales (Hsieh et al., 2014).

#### 5.4.2. Medidas de evaluación de impactos del cambio climático

**Tabla 3**

*Métodos y efectos para evaluar aspectos del cambio climático*

<b>Fuente</b>	<b>Método</b>	<b>Área de estudio</b>	<b>Efecto evaluado</b>
(Sierra et al., 2017)	Modelos numéricos de cálculo sobre la operatividad portuaria	Puerto de Barcelona	Modificaciones en los tiempos de operatividad portuaria asociadas al SLR y a las variaciones del patrón de oleaje inducidas por el cambio climático
(Tovar & Wall, 2014)	Datos de panel y análisis de incertidumbre de la demanda en infraestructura/costos	Sistema portuario estatal español formado por 46 puertos	Efectos de la variabilidad de la demanda sobre los costes portuarios
(Ülengin et al., 2018)	Mapa cognitivo difuso y análisis de escenarios para identificar políticas de reducción de impactos en transporte		Emisiones de gases efecto invernadero del sector transporte.
(Z. Yang et al., 2018)	Análisis de riesgos bayesiano difuso con enfoque híbrido de razonamiento probatorio para clasificar medidas	La Gran China (Hong Kong, Taiwan and Mainland China) – 14 puertos de contenedores	Evaluación de riesgos y costos para generar las mejores prácticas y directrices para proporcionar resiliencia y adaptación a largo plazo a los riesgos del cambio climático
(Scott et al., 2013)	Gestión de riesgos AS/NZS ISO 31000		Vulnerabilidades actuales a fenómenos meteorológicos extremos, integrada con una evaluación de los riesgos climáticos futuros
(Y. C. Yang & Ge, 2020)	Conjuntos difusos y matriz de gestión de riesgos	Kaohsiung port	Evaluación de la vulnerabilidad y la identificación de estrategias de adaptación deseables

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

## 5.5. Situación actual de los puertos frente al cambio climático

En el año 2020, los desastres naturales tales como huracanes e incendios produjeron pérdidas estimadas en US\$210 mil millones en todo el mundo, cerca de las cuales, el 60%, no poseía seguros (Pery et al., 2021). El Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) sobre el Calentamiento Global de 1.5°C, advertía que estos impactos pueden llegar a ser más frecuentes y severos en las próximas décadas.

En su reciente informe, The International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies' (IFRC) afirma que el cambio climático ya está contribuyendo a la crisis humanitaria y detalla que:

*“En los últimos cinco años (2018-2022): a) El 96 por ciento de todos los desastres provocados por peligros naturales fueron causados por fenómenos meteorológicos extremos y relacionados con el clima (esto incluye inundaciones, tormentas, ciclones, sequías, deslizamientos de tierra, incendios forestales, frío y olas de calor); b) Más de 120.000 personas han muerto a causa del clima y de desastres relacionados con el tiempo; c) La asombrosa cifra de 1.590 millones de personas se han visto afectadas por el clima y los desastres relacionados con el tiempo; d) Se estima que 130 millones de personas han sido desplazadas internamente por estos acontecimientos y e) Entre 2010 y 2020, la mortalidad humana por inundaciones, sequías y tormentas fue 15 veces mayor en zonas altamente regiones vulnerables, en comparación con regiones con muy baja vulnerabilidad (IPCC 2023).”.*

Así pues, los eventos climáticos cada vez representan una mayor amenaza en materia de desarrollo en Latinoamérica y el Caribe, y a menos que los puertos tomen medidas de adaptación para dar respuesta a los peligros que enfrentan se contribuirá al aumento de consecuencias y efectos de la crisis ante mencionada.

La UNCTAD y algunas entidades, han propuesto algunas medidas de adaptación al cambio climático en los puertos como se relaciona a la Tabla 4.

Sin embargo, se han reconocido varias barreras para la adaptación climática, incluida la inconsistencia entre los plazos de planificación organizacional (5 a 15 años) en comparación con las proyecciones climáticas de 30 a 90 años; así como la incertidumbre de las proyecciones climáticas locales que lleva a los tomadores de decisiones a retrasar la acción hasta que se perciba que hay más certeza (Scott et al., 2013).

Por otra parte, el Grupo del Banco Interamericano de Desarrollo -BID, con el objetivo de apoyar a constructores y operadores de puerto en la incorporación de las medidas de adaptación, sugiere realizar Plan de monitoreo y evaluación (M&E), mediante indicadores *SMART* (Specific, measurable, achievable, relevant, timely) (Pery et al., 2021).

#### **5.5.1. Puertos fluviales**

Con relación a los ríos, se sabe que especialmente los ríos grandes se usan con fines antropogénicos (abastecimiento de agua potable, generación de energía, transporte fluvial, descarga de aguas residuales etc.) (Gobert, 2023). No obstante, los ríos han sido ampliamente explotados y sometidos a modificaciones profundas del lecho (canalización, tuberías, etc) para apalancar las funciones antes mencionadas (Palmer et al., 2008). Esta infraestructura “dura” (ampliación, profundización, enderezamiento, dique, estabilización de taludes) se ha considerado esencial para el desarrollo humano y una práctica de maniobra con la propia naturaleza para reducir sus peligros (Hommes & Boelens, 2018), transformando el término de río desde la concepción natural a una infraestructura industrial y tecnológica.

Por otro lado, para la navegación por los ríos interiores se debe configurar el tipo de buque acorde con las condiciones de navegabilidad, el calado de agua, el ancho y largo de las esclusas a lo largo de su trayecto (Tan et al., 2015). Sin embargo, los controles locales como los entornos geológicos, el patrimonio geomorfológico, la vegetación y el uso del suelo también son relevantes para determinar los cambios en los sistemas fluviales (Garnier & Lespez, 2019). Así como en los

puertos marítimos hemos descrito los riesgos asociados al cambio climático, en el caso de los puertos fluviales son dos problemáticas las que se han descrito y toman relevancia en las estrategias de adaptación: las inundaciones y los bajos caudales (Gobert, 2023).

En el caso de las inundaciones, las políticas de gestión se han centrado en la planificación, diseño y desarrollo espacial y ha habido un cambio transicional “desde una función de protección civil y política a una política de gestión de riesgos”. En cuanto a los bajos caudales, este fenómeno se ha intensificado progresivamente y se ha convertido en un riesgo significativo ambiental y público, puesto que su aparición y continuidad cuestionan fuertemente la sostenibilidad, sus usos y la red de infraestructura (riego, embalses u otros) (Gobert, 2023); además, de la contención de peligros acorde con conocimientos y datos retrospectivos pero sin deducir la tasa de ocurrencia.

En relación con lo anterior, parte de las discusiones frente a la explotación fluvial es la compensación económica entre la generación de energía hidroeléctrica y los costos ambientales asociados (Bouska et al., 2019) y visto esto, desde la resiliencia, Bouska et al., (2019), desarrollaron diez indicadores de atributos estructurales y funcionales del ecosistema fluvial de llanura aluvial en el río Mississippi y todo el río Illinois, entre los que se destacan indicadores de diversidad y redundancia para hábitats acuáticos, patrones de inundación, indicadores de conectividad, desviaciones de las fluctuaciones de la elevación de la superficie del agua, claridad del agua, concentraciones de nutrientes y especies acuáticas invasoras.

A continuación, se presentan tres casos de estudio, en las que se propusieron estrategias de adaptación a los impactos del cambio climático contra bajos caudales y las inundaciones: 1) Río Sena, 2) Río Rin y 3) Río Yangtze :

1. *El Sena: Nuevos proyectos de canalización y almacenamiento de agua durante las inundaciones:* El río Sena es un curso de agua europeo de la vertiente atlántica que discurre únicamente por Francia, con una longitud de casi 776 km y es el tercero más largo de este país. Su navegación ha dado lugar a la simplificación y profundización del canal así como su regulación

del paso a través de esclusas. La mayoría de las islas han sido reconectadas a los bancos para garantizar la protección contra inundaciones y descargas de agua (Gobert, 2023).

La regulación de París llevó a la creación de cuatro embalses principales: Yonne, Alto Sena, Ríos Aube y Marne, que constituyen los instrumentos de habilitación de la EPTB Seine Grands Lacs (establecimiento público de la cuenca territorial). Estos facilitan la reducción de las inundaciones, aunque por su posición aguas arriba de la zona de captación quedan desprotegidas las zonas río abajo.

Con el fin de promover una solución “natural”, se propuso la restauración de humedales y áreas de expansión para detener los eventos de inundaciones que pasaron de ser moderadas a fuertes, bajo la idea de volver a dotar a los espacios de una función que se les había retirado y/o encontrar nuevos espacios para facilitar el almacenamiento temporal de agua, aunque ello implique cambios en el uso de la tierra y la implementación de sistemas de control técnico (Gobert, 2023).

## *2. Región del Alto Rin: ¿Cómo superar los bajos niveles de caudal? Discusión de soluciones posibles*

Con una longitud de 1230 km, el Rin es la vía fluvial más utilizada de la Unión Europea (UE); es navegable en un tramo de 883 km y entre las ciudades más grandes e importantes de este río se encuentran Basilea (Suiza), Estrasburgo (Francia), Colonia, Düsseldorf (Alemania) y Róterdam (Países Bajos) (Oelze, 2022).

En 2018, un largo e inesperado período de bajos flujos afectó su navegabilidad consecuencia de varios meses de sequía junto con olas de calor y lluvias limitadas en el mismo período (Gobert, 2023).

Entre los problemas observados se encontró: aumento de los costos de transporte de mercancías por río; transición a otros sistemas intermodales de transporte (ferrocarril o carretera) y pérdida de las mercancías dependiendo de la naturaleza del material y su fragilidad (Gobert, 2023).

Bajo un método mixto y fundamentado en una estrategia adaptativa, se planificó la adecuación de la infraestructura para aumentar en el nivel del agua mediante el uso del lago de Constanza como depósito de agua y la canalización del cuello de botella de Kaub (Gobert, 2023).

### 3. *El Río Yangtze:*

Es el río más largo de China y del continente asiático que fluye a través de ocho provincias (Anhui, Hubei, Hunan, Jiangsu, Jiangxi, Qinghai, Sichuan y Yunnan), las municipalidades de Chongqing y Shanghái, y la región autónoma del Tíbet, hasta desaguar en el mar de la China Oriental, cerca de Shanghái. Tiene una longitud de 6300 km y es el tercero más largo del mundo, tras el Amazonas y el Nilo.

Desde el 2015 China continuaba impulsando el transporte por vías navegables interiores del río Yangtze (Tan et al., 2015) y se puso en marcha la construcción de canales de 12,5 metros de profundidad en los tramos inferiores de la sección de Nanjing y vías fluviales de 4,5 metros de profundidad en la sección de Wuhan. Para el año 2015, las vías navegables ascendían a 13.000 Km, con lo que se esperaba reducir la congestión del transporte por carretera a pesar de la sobreutilización de navegación interior (Gobert, 2023; Tan et al., 2015). No obstante, la contaminación del agua y la congestión de las vías navegables por el transporte marítimo se convirtieron en una preocupación creciente para el público (Tan et al., 2015; Veenstra & Notteboom, 2011).

En un análisis de la compensación ecológica al río Yangtze, donde se evaluó la afectación de las condiciones climáticas regionales se indica que el aumento en el área forestal beneficia el crecimiento de las plantas al facilitar la conservación del agua en sitio; así mismo, nuevas fuentes de agua y suelo fertilizado garantizan la conservación de la vegetación y por ende el consumo de materia orgánica, el florecimiento de las plantas y el mantenimiento de la cubierta vegetal (Xu et al., 2021) .

A continuación, se relaciona en la Tabla 4 algunas medidas de adaptación al cambio climático sugeridas por entidades internacionales que proponen estrategias para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

**Tabla 4**

*Medidas de adaptación al cambio climático propuestas para en puertos marítimos por entidades internacionales, revisión de la literatura 2012-2023*

<p><b>UNCTAD (2011)</b></p>	<p><b>The Ministry of Transportations and Communications (2014)</b></p>	<p><b>National Climate Change Adaptation Action Plan for 2013–2017</b></p>	<p><b>National Climate Change Adaptation Action Plan for 2018– 2023</b></p>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Integración de los procedimientos de evacuación de emergencia en las operaciones</li> <li>2. Instalación de barreras y estructuras de protección</li> <li>3. Reubicación de infraestructura</li> <li>4. Garantizar el funcionamiento de rutas alternativas</li> <li>5. Mayor seguimiento de las condiciones de la infraestructura</li> <li>6. Restricción del desarrollo y asentamiento en áreas bajas</li> <li>7. Construcción de estructuras de retención de pendientes.</li> <li>8. Preparación para retrasos o cancelaciones del servicio</li> <li>9. Ajustes a la velocidad y frecuencia del servicio</li> <li>10. Fortalecimiento de cimentaciones, elevación de niveles de muelles y muelles</li> <li>11. Tecnologías inteligentes para la detección de eventos anormales</li> <li>12. Nuevo diseño para barcos más resistentes</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Implementación de un monitoreo regular a largo plazo de mareas y oleaje en los puertos</li> <li>2. Proporcionar información de referencia para el futuro diseño y revisión de las instalaciones portuarias.</li> <li>3. Revisión de antiguos muelles e implementación de reconstrucción urgente</li> <li>4. Trabajo en respuesta al cambio climático, incluido el examen del muelle, altura de la superficie, capacidad anti-olas, capacidad sísmica y trayectoria y capacidad de carga de la cimentación.</li> <li>5. Realización de exámenes físicos y evaluaciones de seguridad de instalaciones portuarias; finalización de las reparaciones necesarias.</li> <li>6. Mejora de la capacidad de distribución de lluvia para asegurar que las inundaciones no ocurran debido al bloqueo del drenaje</li> <li>7. Revisión de las especificaciones de diseño y</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Realizar periódicamente monitoreos a largo plazo del nivel de mareas y oleaje en el puerto como referencia para el diseño y revisión de instalaciones en el futuro.</li> <li>2. Revisar las necesidades y urgencia de reconstrucción de la antigua terminal en respuesta al cambio climático, incluida la elevación del muelle, la resistencia de las olas,</li> <li>3. capacidad sísmica y capacidad de carga de cimientos de vía.</li> <li>4. Realizar un examen físico y evaluación de seguridad del puerto,</li> <li>5. instalaciones y realizar las reparaciones necesarias.</li> <li>6. Planificación general para estudiar la necesidad de crear una infraestructura viva en el puerto, y la posible ubicación y métodos de construcción</li> <li>7. Investigación de mejoras en las instalaciones de drenaje en zonas propensas a inundaciones de la zona portuaria durante fuertes lluvias</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fortalecimiento de las instalaciones portuarias en respuesta al cambio climático: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Revisión de la norma de diseño de estructuras portuarias</li> <li>▪ Vigilancia meteorológica marina</li> <li>▪ Construcción de terminales críticas</li> <li>▪ Manejo de muelles y monitoreo de áreas portuarias: agua portuaria continua y medición de la tierra, construcción del sistema de monitoreo CCTV, inspección periódica de la estructura, inspección submarina e inspección de operaciones</li> </ul> </li> <li>2. Fortalecimiento de las instalaciones terminales en respuesta al cambio climático y aumento del nivel del mar: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fortalecer las instalaciones de drenaje de los muelles existentes: gestionar la mejora del sistema de drenaje y construcción de la zanja después de la precipitación para recoger el sedimento antes de descargarlo en el mar</li> </ul> </li> </ol>

<p>13. Desarrollo de nuevas normas de diseño para estructuras hidráulicas como canales de drenaje</p> <p>14. Mejor planificación del uso del suelo en zonas propensas a inundaciones</p> <p>15. Construcción de cuencas de retención de tormentas para inundaciones</p>	<p>construcción portuarias y portuarias pertinentes, para evitar la destrucción de las estructuras portuarias e interrupción de las operaciones en caso de eventos climáticos extremos</p> <p>8. Ajuste de las configuraciones, formas y medidas de las defensas de caucho de atraque de buques</p> <p>9. Métodos de construcción para reducir el impacto de condiciones climáticas extremas y prevenir daños indirectos a las defensas del muelle.</p>	<p>8. Realizar una inspección general de la elevación de la terminal y desarrollar medidas que afecten a las instalaciones de back line de la terminal.</p> <p>9. Revisar las especificaciones pertinentes de diseño y construcción del puerto para prevenir los daños causados por eventos extremos a las estructuras del puerto</p> <p>10. Revisar y ajustar la configuración, forma y método del barco</p> <p>11. Defensas de goma delante de la litera para reducir el daño a</p> <p>12. la pared de la costa y las defensas indirectamente debido a eventos extremos de cambio climático.</p> <p>13. Manejar el plan de remediación del área de sedimentos para mantener el funcionamiento normal del puerto.</p>	<p>▪ Mejorar el nivel de elevación de diseño de nuevos muelles y rompeolas</p>
---	---	--	--

Nota. Fuente: Elaboración propia (2023)

### **5.5.2 Sedimentos**

Por otro lado, las zonas portuarias también están suscitando una creciente preocupación debido a la contaminación relacionada con actividades laborales y otras fuentes de contaminación como aguas residuales y vertidos, los cuales tienen un efecto directo en el medio marino y la salud humana (Sciarrillo et al., 2020). Además, se ha informado que los sedimentos suspendidos no solo transportan carbono orgánico, nutrientes y metales pesados en los sistemas fluviales, sino que también desempeñan un papel vital en la degradación del suelo (Li et al., 2023).

Su gestión en vías fluviales y puertos es un problema importante por las siguientes razones (Sciarrillo et al., 2020; Zentar et al., 2023):

1. Su acumulación impacta la economía de las regiones al obstaculizar el sistema de transporte
2. Exhiben diferentes niveles de contaminación y sirven como sumideros finales de la mayoría de los contaminantes
3. Se requiere de la gestión mediante dragado hasta vertido y/o valorización
4. Alteraciones físicas y entierro de hábitats bentónicos y aumento de la turbidez del agua (Cesar et al., 2014)

Así mismo, frente al papel de los sedimentos superficiales se indica que son importantes desde el punto de vista ecológico debido a la relación sedimento-agua, su intercambio y bioturbación (Sciarrillo et al., 2020).

El dragado, es una práctica común en todo el mundo, dado las características de las masas de agua costeras, especialmente los estuarios, que son propensos a la sedimentación natural o a la sedimentación acelerada por actividades humanas, sin embargo, la eliminación del material dragado se considera un problema en la gestión de las zonas costeras (Cesar et al., 2014).

Aunque en muchos países, los permisos para la eliminación marina de sedimentos sólo se conceden después de verificar los niveles de contaminantes y el cumplimiento de niveles de calidad estándares, existe la posibilidad de dañar la biota residente en sitio por la movilización

de compuestos tóxicos y diferencias fisicoquímicas (potencial redox, granulometría u otros)(Cesar et al., 2014; Ferraro et al., 2023).

Algunos ejemplos de puertos que reportan estudios sobre sedimentos son:

1. Puerto marítimo de Nápoles: Desde 2015, algunos autores reportaron que el puerto estaba contaminado en la zona de puerto y el sector sureste producto de actividades de construcción naval y refinerías de petróleo, respectivamente (Adamo et al., 2015, Qu et al., 2018; Qu et al., 2019). Por su parte, Sciarrillo et al., 2019 evaluaron la presencia de hidrocarburos (HC), once metales/metaloideos (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb y Zn) e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), (Sciarrillo et al., 2020), mediante análisis multivariados lograron interpretar la geoquímica del comportamiento de los contaminantes y medir la ecotoxicidad.

2. Costa Rica: Se evaluó la presencia de PTE (As, Hg, Pb y Zn) en sedimentos arenosos de la costa, dadas las características de toxicidad, alta persistencia y no biodegradabilidad de estas moléculas en el medio ambiente (Ahmed et al., 2020). Adicional a ello, los fenómenos de adsorción consecuencia de la variación de las condiciones ambientales (potencial redox, temperatura y pH) se han visto involucradas en la capacidad de liberación del sólido en fase acuosa (Tian et al., 2020)(Ferraro et al., 2023)

3. Brasil: El puerto Santos juega un papel importante en el contexto nacional brasileño, debido a su tamaño y capacidad de envío (Torres et al., 2009). Este es la principal puerta de entrada y salida de productos del país, además de ser una región ambientalmente relevante ya que el sistema estuarino de Santos está rodeado por manglares, que representan el 43% del área total de marismas en el estado de São Paulo (Cesar et al., 2014).

Los resultados del análisis se integraron mediante técnicas de análisis multivariado como el análisis factorial (FA) y el análisis de componentes principales (PCA) demostrando que a pesar de la detección de contaminantes por debajo de los límites de la legislación brasilera, los efectos biológicos relacionados con metales (toxicidad crónica) y compuestos orgánicos (toxicidad

aguda) en sitios de disposición y adyacentes del dragado del puerto, generan perturbaciones ecológicas (Cesar et al., 2014; Torres et al., 2009).

## **5.6. Estimación de GEI y huella de carbono sector portuario**

Los Gases de Efecto Invernadero – GEI son gases presentes en la atmósfera que tienen la capacidad de atrapar el calor del sol y contribuir al efecto invernadero, que es esencial para mantener la temperatura de la Tierra en niveles adecuados para la vida. Sin embargo, las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, han aumentado la concentración de estos gases, intensificando el efecto invernadero y contribuyendo al cambio climático. Los principales GEI incluyen dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

La huella de carbono se refiere a la cantidad total de gases de efecto invernadero, expresada en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), que son emitidos directa o indirectamente por una entidad, producto, evento o individuo a lo largo de su ciclo de vida. Se utiliza como una medida para cuantificar el impacto ambiental en términos de contribución al cambio climático. Calcular la huella de carbono implica considerar todas las etapas, desde la extracción de materias primas, la producción, el transporte, el uso y, eventualmente, la eliminación de un producto o servicio.

Las mayores emisiones que genera la actividad portuaria están relacionadas con la cadena de suministro y las emisiones de los barcos mientras se encuentran en los puestos de atraque (Transport & Environment, 2022). El compromiso consiste en la descarbonización del sector regulando a nivel gubernamental las emisiones.

## 6. DISEÑO METODOLOGICO

### 6.1. Tipo de Investigación

Esta investigación es de tipo cuali-cuantitativa correlacional, aplicada al puerto COMPAS en Barranquilla, que se desarrolla en las siguientes fases:

### 6.2. Análisis Interno

Con el fin de reconocer y analizar la situación actual de la zona portuaria de COMPAS Barranquilla y los factores organizativos del mismo, se aplicó un cuestionario electrónico (Anexo 1) a 23 colaboradores del puerto COMPAS en Barranquilla en todos los niveles jerárquicos (Directivos, operarios). El instrumento fue diseñado con preguntas en escala Likert y fue validado por un grupo de expertos para evaluar los criterios de asertividad en la redacción, enfoque conceptual y correlación de las preguntas con el objeto de investigación. El muestreo fue de tipo no probabilístico por conveniencia. El criterio para la escogencia de los entrevistados fue obtener información desde las diferentes áreas del puerto, se aplicó la entrevista al gerente pasando por los mandos medios como los jefes de áreas hasta llegar a los operarios; y así obtener los puntos de vista y el grado de conocimiento de todos los niveles.

**Tabla 5**

*Ficha técnica de instrumento de encuestamiento*

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
<b>Periodo de recolección de datos</b>	Agosto de 2023
<b>Ciudad de aplicación</b>	Bogotá D.C, y Barranquilla
<b>Cargo de las personas consultadas</b>	Directivos, gerentes, directores y supervisores de operación, directores de riesgos, HSE y sostenibilidad.
<b>Población</b>	
Operaciones	39
Protección	6
Mantenimiento	3
HSE	6
Administrativo y TI	14

<b>Total</b>	<b>68</b>
<b>Muestra</b>	<b>23</b>

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

### **6.2.1 Diseño del instrumento**

Se diseñó la encuesta con base en 5 áreas (ver anexo 1):

1. Identificación de las amenazas climáticas: En la cual se consideran fenómenos climáticos, infraestructura del puerto, frecuencia de eventos y la gravedad de amenazas.
2. Identificación de la Exposición: Se tuvo en consideración diferentes áreas del puerto que pueden ser mayormente afectadas por la variabilidad climática.
3. Identificación de la Sensibilidad o Susceptibilidad: Teniendo en cuenta niveles de afectación a las personas, en la infraestructura, en la operación.
4. Identificación medidas de adaptación: busca identificar áreas que requieran adaptación o protección ante los eventos climáticos y su efectividad, sentido de urgencia en el personal para tomar medidas ante los cambios cada vez más frecuentes del clima.
5. Gestión del cambio climático: se presenta sobre el conocimiento e implementación del programa de gestión de cambio climático en la empresa.

### **6.2.2. Validación del instrumento**

Cinco expertos valoraron la calidad del cuestionario planteado y calificaron cada pregunta de acuerdo con los siguientes criterios de evaluación: 1. Claridad de la redacción, 2. Enfoque de información que se espera obtener, 3. Facilidad de respuesta de la encuesta y 4. Relación pregunta – variable. La calificación uno (1) considera que la pregunta está adecuadamente dirigida o con cero (0) si la pregunta debe reformularse o mejorar su planteamiento en relación con la variable evaluada y, se calculó el coeficiente de Aiken (V) con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{S}{n(C - 1)}$$

Donde: S es la suma de respuesta de cada experto Si

n es el número de jueces

c es el número de valores de la escala de evaluación

1 calificación si la pregunta es adecuada según calificación del experto i

0 calificación si la pregunta no es adecuada o debe replantearse según calificación del experto i

Un alto coeficiente Aiken indica mayor aprobación de los expertos; sí el coeficiente de Aiken es 1, se muestra unanimidad de aprobación, por debajo de este valor, uno o más expertos considera que la pregunta debe ser ajustada (Mares Ruiz, 2020).

La encuesta buscaba identificar el conocimiento y percepción, por parte del personal de COMPAS, las amenazas a las cuales está expuesto el puerto, a reconocer cuales aspectos de la empresa está más expuesto, cuales de esas amenazas frente a la terminal tendrían una mayor afectación en caso de que ocurran, igualmente, reconocer algún tipo de capacidad y su resiliencia a los cambios que se están presentando en el clima. Finalmente, qué se está realizando desde la terminal para gestionar esos cambios que afectan la operación.

## **6.3 Análisis Externo**

### **6.3.1. DOFA**

Mediante la metodología DOFA, se realizó el análisis externo con el fin de identificar atributos como Oportunidades y Amenazas (OA) y relacionarlas con las condiciones internas del entorno como Fortalezas y Debilidades (FD). Los datos fueron obtenidos mediante entrevistas realizadas de manera presencial en mayo 2023, por una visita realizada al puerto COMPAS de Barranquilla los coordinadores de operaciones, mantenimiento, HESQ y personal y virtual al gerente.

### **6.3.2. Evaluación de variables meteorológicas**

Se evaluaron variables meteorológicas asociadas al cambio climático, de la siguiente manera: primero se obtuvieron los datos y luego se realizó la construcción de los modelos de las series temporales de las variables.

Para realizar el estudio de los patrones hidroclimáticos, asociado al cambio climático, de la región de interés, se analizaron datos de las estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y de la Dirección General Marítima (DIMAR, con registros diarios de 5 variables meteorológicas:

- Temperatura (°C),
- Precipitación (mm),
- Nivel del mar (m),
- Nivel del río (m), y
- Sedimentos (kton/día).

Se analizaron cinco series de tiempo correspondiente a los registros diarios entre 1980 y 2022, de estas variables. Se procesó la base de datos de las variables hidroclimatológicas diarias para resumir la información por mes, considerando que su representatividad si al menos el 75% de sus datos son válidos; de lo contrario, se descartaba el dato mensual y registraba un dato faltante. Posteriormente, mediante la técnica LOESS (Dancho, et al, 2023), se procedió a imputar los datos faltantes, para mejorar la estimación de las estadísticas descriptivas anuales, como la media y la desviación estándar.

Se realizó un análisis descriptivo de **temperatura** que incluye la construcción de mapas de calor con representación de promedios mensuales, relacionando meses y años, resultando como tendencia general que los meses centrales del año, entre abril y noviembre, son los más

cálidos, mientras que los meses de diciembre hasta marzo son los más fríos. Se nota que la temperatura varía de un año a otro, con algunas distribuciones más anchas que otras, lo que sugiere cambios en la consistencia de las temperaturas a lo largo de los años. Los picos máximos de temperatura se registraron en los años más recientes, mientras que los valores más bajos se observan en intervalos dispersos a lo largo del periodo representado. Se aplicaron pruebas de normalidad (Prueba de Shapiro-Wilks) y estacionariedad (Prueba de Dickey-Fuller) a la serie de tiempo de temperatura, donde la prueba de normalidad indica que la serie de tiempo no sigue una distribución normal en tanto que, los resultados de la prueba de estacionariedad indican que la serie es estacionaria, lo que significa que, según esta prueba, la media y la varianza de la serie se mantienen constantes a lo largo del tiempo.

Para examinar la autocorrelación en la serie de tiempo, se calcularon la función de autocorrelación (ACF) y la función de autocorrelación parcial (PACF), como se podrá observar más adelante. Así mismo, se ajustó un modelo ARIMA(3,1,2) .

Para evaluar la significancia estadística de los cambios evidenciados en los resultados, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA), además de la aplicación de la prueba Student-Newman-Keuls (SNK) y finalmente se aplicó la fórmula de tasa de variación porcentual ( $TV$ ) para analizar el cambio anual en la temperatura. La ecuación utilizada es la siguiente:

Para realizar el análisis descriptivo de precipitación se construyó un mapa de calor de la frecuencia de días lluviosos y secos clasificados por mes y año, donde se identificaron meses con una frecuencia elevada de lluvia, particularmente de mayo a noviembre, contrastando con la menor frecuencia de días húmedos de diciembre a abril.

Para realizar un estudio más profundo de la evolución de la precipitación diaria promedio en milímetros desde 1980-07-01 hasta 2015-07-0, donde se evidenció una notable variabilidad en la precipitación, con picos pronunciados que señalan días de lluvias intensas. Esta variabilidad es distinta según los años, indicando estaciones o años de diferente intensidad. El periodo 2005

- 2011 destaca por varios picos de fuerte precipitación, sugiriendo eventos o estaciones lluviosas más activas. Los años más lluviosos son 2010 y 2011. Posteriormente, desde 2015, la precipitación muestra menor intensidad y variabilidad, posiblemente indicando un periodo de más sequía.

Para el análisis de resultados obtenidos de aplicar pruebas estadísticas sobre la secuencia temporal de precipitación, mediante la prueba de Shapiro-Wilks se evalúa la normalidad, la prueba de Dickey-Fuller que determina la estacionariedad, lo que confirma que la serie temporal es estacionaria, implicando que su promedio y dispersión permanecen constantes a lo largo del tiempo. Esta relación parece incongruente, dado que la serie tiene comportamiento intermitente.

En el estudio de esta variable se utilizaron las funciones de Autocorrelación (ACF) y de Autocorrelación Parcial (PACF) para una serie de tiempo del promedio mensual de la precipitación por día. Posteriormente y basado en los resultados obtenidos, se consideró que no es apropiado adaptar un modelo autorregresivo debido a las propiedades observadas en las series de tiempo y en su lugar, se procedió con una descomposición STL,

Para evaluar la diferencia estadística de las fluctuaciones observadas, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existe una variabilidad significativa en las medias anuales de precipitación. De igual manera se aplicó la prueba de Student-Newman-Keuls (SNK) para identificar diferencias significativas entre las medias anuales de precipitación.

En el análisis de la variable nivel del mar se observó una serie de tiempo, en metros desde 2017-12-01 hasta 2022-12-01, periodo durante el cual el nivel del mar varía en un rango entre 1.9 y 2.6 m. Después de 2020, se percibe un aumento en la frecuencia de picos altos, sugiriendo posibles episodios regulares de niveles elevados del mar.

Al igual que en las variables anteriores se analizaron resultados de las pruebas de Shapiro-Wilks para normalidad y de Dickey-Fuller y las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) para la serie de tiempo de nivel del mar, además del modelo autorregresivo (ARIMA) , se realiza un ANOVA y se utilizó la ecuación de tasa de variación porcentual ( $TV$ ) para evaluar los promedios anuales del nivel del mar.

Para el análisis de la variable **nivel del río Magdalena**, se analizó una serie de tiempo del nivel del río en metros 1996-01-01 hasta 2018-11-01, periodo en el cual el nivel del río varió en un rango entre 0.1 y 2.4 m.

Al igual que en las variables anteriores se analizaron los resultados obtenidos de las pruebas de Shapiro-Wilks para normalidad y de Dickey-Fuller para la estacionariedad, las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF), el análisis del modelo ARIMA, la prueba la prueba de Jarque-Bera y el análisis de análisis de varianza (ANOVA) y la ecuación de tasa de variación porcentual ( $TV$ ) para evaluar los promedios anuales del nivel del mar.

Para el estudio de la variable **de la sedimentación en el río Magdalena** se analizó una muestra la serie de tiempo de sedimentos en  $\text{kton dia}^{-1}$  desde 1972-01-01 hasta 2014-12-01.

Al igual que en las variables anteriores se analizaron los resultados obtenidos de las pruebas de Shapiro-Wilks para normalidad y de Dickey-Fuller para la estacionariedad, las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF), el análisis del modelo ARIMA, la prueba la prueba de Jarque-Bera, análisis STL, el análisis de análisis de varianza (ANOVA) y la ecuación de tasa de variación porcentual ( $TV$ ) para evaluar los promedios anuales sedimentación.

Se realizó un análisis de correlación entre precipitación, nivel del río y sedimentación, centrándose en el intervalo de 1996 a 2014, que incluyó una matriz de gráficos correspondientes para el análisis de series de tiempo en estas tres variables.

De igual manera se ha estudiado el comportamiento de variables climáticas como la temperatura, la precipitación, el nivel del río/mar y los sedimentos, identificando un incremento progresivo en la temperatura a lo largo de los años, alineándose con las tendencias globales del cambio climático, utilizando técnicas como la prueba de Student-Newman-Keuls (SNK).

### **6.3.3. Metodología de evaluación de la vulnerabilidad del puerto Compas Barranquilla**

La metodología de evaluación de la vulnerabilidad del puerto Compas Barranquilla se basó principalmente en Plan de gestión del cambio climático para los puertos marítimos de Colombia (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016). Teniendo en cuenta las recomendaciones de la norma NTC-ISO 14091 (ICONTEC, 2021), los datos globales del informe AR6 de IPCC (IPCC, 2023), y el Plan Nacional de Adaptación al cambio climático (PNACC, 2016).

Primero, se definieron los eventos climáticos extremos que se generan principalmente en la zona geográfica a evaluar, para obtener la información climática y crear la línea base histórica de la región.

que para el caso de estudio son los siguientes:

1. Variación del río
2. Sedimentación por Erosión/socavación de márgenes del puerto
3. Inundación por lluvia (pluvial)
4. Tormenta Eléctrica
5. Vendaval (ráfagas de viento)
6. Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)

Posteriormente con la información obtenida de los procesos de la terminal, se priorizaron los de mayor interés: Infraestructura portuaria, equipos portuarios, operatividad portuaria, carga, descarga, transporte carga, almacenamiento de carga, seguridad, salud en el trabajo, y relacionamiento comunidades.

#### **6.3.3.1. Cálculo del índice de riesgo climático - IRCE**

Es necesario identificar los posibles impactos que la variabilidad climática puede causar en la empresa basados en los escenarios que analiza la Tercera Comunicación Nacional del IDEAM (2017).

Basados en las disposiciones señaladas por el ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y cuya metodología contiene los siguientes puntos que se muestran a continuación (Minambiente; Invermar; Mintransporte, 2016), se calculó el índice de riesgo de que ocurra el impacto, con la siguiente ecuación:

$$IRCE = PO \times CE$$

Donde,

Índice de Riesgo Climático Empresarial – IRCE, es igual a:

PO: Probabilidad de ocurrencia

CE: Consecuencias esperadas

#### **6.3.3.2. Cálculo de la vulnerabilidad climática empresarial - VuCE**

Posteriormente, se calculó la vulnerabilidad climática empresarial acorde con la ecuación:

$$VuCE = IRCE * CA$$

Donde,

Vulnerabilidad Climática Empresarial es VuCE, y esta es igual a:

IRCE: Índice de Riesgo Climático Empresarial

CA: Capacidad de Adaptación

### **6.4. Diseño de estrategias de adaptación al cambio climático**

A partir de los resultados del IRCE y el VuCE, asociado con los resultados del DOFA mediante la metodología de Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia – PGCCPM, se diseñaron las estrategias de adaptación al cambio climático para el puerto COMPAS en Barranquilla, siguiendo los siguientes criterios:

- a. Índice de Vulnerabilidad
- b. Tiempo de implementación
- c. Costos de implementación
- d. Seguimiento y monitoreo

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Evaluación de las condiciones operativas y territoriales del puerto

#### 7.1.1. *Medición interna frente al cambio climático*

##### Amenazas

A partir de los resultados de la encuesta se destaca con una mayor probabilidad de ocurrencia el “Vendaval (ráfagas de viento), ya que el 43% de las 23 personas respondieron que definitivamente si podía ocurrir; la “ola de calor” y la “erosión/socavación de márgenes de puertos” fueron las siguientes opciones que recibieron alta posibilidad de ocurrencia con un 34% cada uno.

En el nivel directivo (gerencia y directores), las variables que tienen mayor número de respuestas con un “definitivamente sí”, son: la “erosión/socavación...”, seguido por “vendaval”, “tormenta” y “ola de calor”.

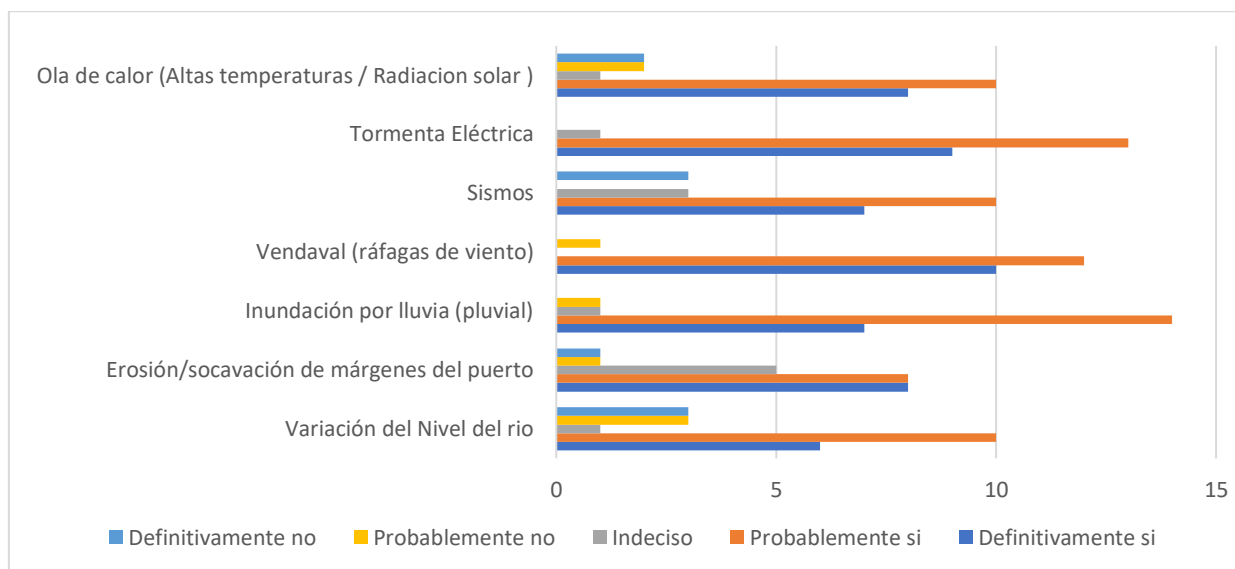
Cuando se analizaron los auxiliares de operaciones con un “definitivamente sí”, las dos variables que tienen mayor representación son: “tormenta” y “ola de calor”.

Para los profesionales relacionados con el área de HSE, identifican con un “definitivamente sí”, las variables relacionadas con la “variación del nivel del río” y la “erosión/socavación”. En resumen, los “sismos”, la “inundación por lluvia” y los “vendavales (ráfagas de viento)”, son las amenazas que tienen mayor peso porcentual.

En la figura 12 se muestran los resultados del análisis interno respecto a las variables/fenómenos climáticos considerados como una amenaza para la operación/infraestructura del puerto.

**Figura 12**

*Amenazas identificadas en el análisis interno del puerto COMPAS, Barranquilla*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Con respecto a las áreas del puerto que pueden ser amenazadas por los efectos del cambio climático, se observó que los sectores con mayor número de referencias son, en su orden: “áreas de patio”, “muelles y equipos”, seguido por “bodegas” y “edificios”, distantes de las demás opciones.

Por otra parte, la frecuencia con la que ocurren eventos como sismos, vendales o inundaciones, el personal de COMPAS Barranquilla identifica los “sismos” con la variable “nunca-no ha ocurrido en la última década”; en tanto que, por la ubicación del puerto, “la ola de calor” es

la respuesta que tiene mayor repetición en la opción “muy frecuente”. Los eventos “erosión” y “vendaval” también tienen una importante representación, pero no tan alta como las anteriores.

Uno de los elementos a revisar es la expresión de no tener información suficiente o no saber sobre la frecuencia con que ocurren o pueden ocurrir ciertos eventos.

El impacto que podrían causar las altas temperaturas, en la opinión de los encuestados, es considerado como “grave”, seguido por la ocurrencia de “sismos”, “vendavales” o “inundaciones”.

Al revisar las respuestas por niveles, se puede observar que, para los directivos, los “sismos” tienen opiniones variadas, que van entre “insignificante” y “catastrófico”, lo cual evidencia una opción de mejora para unificar criterios. En tanto para el personal auxiliar, asistente y otros, los sismos se calificaron como “graves” o “catastróficos”.

La “variación del nivel del río” tiene alta significancia también entre los encuestados, ya que el 73% de ellos lo califican entre “grave” y “catastrófico”. En este punto también puede existir una opción de mejora para unificar criterios frente a estos eventos, ya que, para el personal de operaciones en sus distintos niveles, hay opiniones que van desde insignificante hasta catastrófico.

**Tabla 6**

*Percepción de la gravedad de las amenazas climáticas en COMPAS Barranquilla (en número de personas)*

<b>CARGO/VARIABLES</b>	<b>X<sub>1</sub></b>	<b>X<sub>2</sub></b>	<b>X<sub>3</sub></b>	<b>X<sub>4</sub></b>	<b>X<sub>5</sub></b>	<b>X<sub>6</sub></b>	<b>X<sub>7</sub></b>
<b>Insignificante</b>	2	0	0	0	2	0	0
<b>Menor</b>	4	5	3	3	0	4	6
<b>Grave</b>	7	7	8	9	7	7	12
<b>Crítico</b>	8	6	9	7	4	8	4
<b>Catastrófico</b>	2	5	3	4	10	4	1
<b>Total encuestados</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>23</b>

*Nota:* X1: Aumento en el nivel del río, X2: Sedimentación por Erosión/socavación de márgenes del puerto, X3: Inundación por lluvia (pluvial), X4: Vendaval (ráfagas de viento), X5: Sismo, X6:

Tormenta (descarga eléctrica), X7: Ola de calor (Altas temperaturas/radicación solar). Fuente: Elaboración del autor (2023)

### Exposición

Por otro lado, las opiniones que hay en los encuestados, sobre el nivel de exposición de la infraestructura ante las amenazas, presenta a las “estructuras de protección de muelle/puerto” con el mayor número de respuestas en el nivel “alto” de exposición, seguido por “taller/área de mantenimiento” y “subestaciones eléctricas”. En el nivel de “muy alto” las respuestas solo representan un 8% en promedio y están relacionados con un profesional de operaciones y un analista de documentación.

### Sensibilidad (Susceptibilidad)

En cuanto a las amenazas que pueden impactar negativamente la infraestructura, personal, operación, las respuestas ofrecidas por los encuestados se puede observar que las opciones más seleccionadas son “operación” e “infraestructura”, con un 23% (cada una) de las respuestas, seguido por “personal”, “motonave” y “carga”.

### Medidas de adaptación

Se muestra diferencia en la percepción entre la gerencia y los demás integrantes del equipo directivo frente a las áreas que requieren mantenimiento o construcción de obras de adaptación o protección ante las amenazas de la variabilidad y cambio climático; obteniendo los mayores resultados los muelles y las subestaciones eléctricas las que deberían tener una mayor protección.

### Gestión organizacional del cambio climático

Al preguntar si la compañía “considera en su programa de gestión frente al cambio climático las amenazas y la vulnerabilidad portuaria”, se observó que existe en general acuerdo que la

empresa sí considera en su programa de gestión ambiental, el cambio climático; excepto en 3 de los encuestados, donde uno menciona estar “totalmente en desacuerdo” y dos de ellos “indeciso”. Al respecto, puede interpretarse que existe una opción de mejora en la comunicación de planes y programas al interior de la organización.

Sobre el conocimiento de las acciones implementadas por COMPAS frente al cambio climático se destaca la “gestión del agua y residuos” que se menciona por un 87% de los encuestados, seguido por la “gestión del conocimiento del cambio climático” con un 70%; luego la “reducción de la huella de carbón”; en tanto con el menor porcentaje de participación están “evaluación y reducción de gases de efecto invernadero” y la “formulación de medidas de adaptación” con un 35% y 26% respectivamente, según se puede observar en la tabla 7.

Sobre el conocimiento de las acciones implementadas por COMPAS frente al cambio climático, se destaca que el 87% de los encuestados respondió que conoce las acciones relacionadas con la “gestión del agua y residuos”, es decir 20 personas de las 23 encuestadas. Al indagar sobre la “gestión del conocimiento del cambio climático”, tan solo 16 personas de las 23 (70%) encuestados expresaron conocer del tema.; en tanto que las acciones sobre “evaluación y reducción de gases de efecto invernadero” y la “formulación de medidas de adaptación” resultaron ser las menos conocidas por el personal encuestas, donde tan solo 8 y 6 funcionarios respondieron conocer sobre dichos asuntos.

**Tabla 7**

*Percepción sobre acciones implementadas frente al cambio climático, COMPAS Barranquilla*

<b>Acciones implementadas frente a cambio climático</b>	<b>Personal que conoce las acciones (%)</b>
<b>Evaluación y reducción de gases de efecto invernadero</b>	8 de 23 (35%)
<b>Plan de eficiencia energética</b>	11 de 23 (48%)
<b>Uso de energías renovables</b>	20 de 23 (43%)
<b>Reducción de huella de carbono</b>	15 de 23 (65%)

<b>Gestión del agua y residuos</b>	20 de 23 (87%)
<b>Gestión del conocimiento del cambio climático</b>	16 de 23 (70%)
<b>Análisis de vulnerabilidad</b>	13 de 23 (57%)
<b>Formulación de medidas de adaptación</b>	6 de 23 (26%)
<b>Otras</b>	8 de 23 (3%)

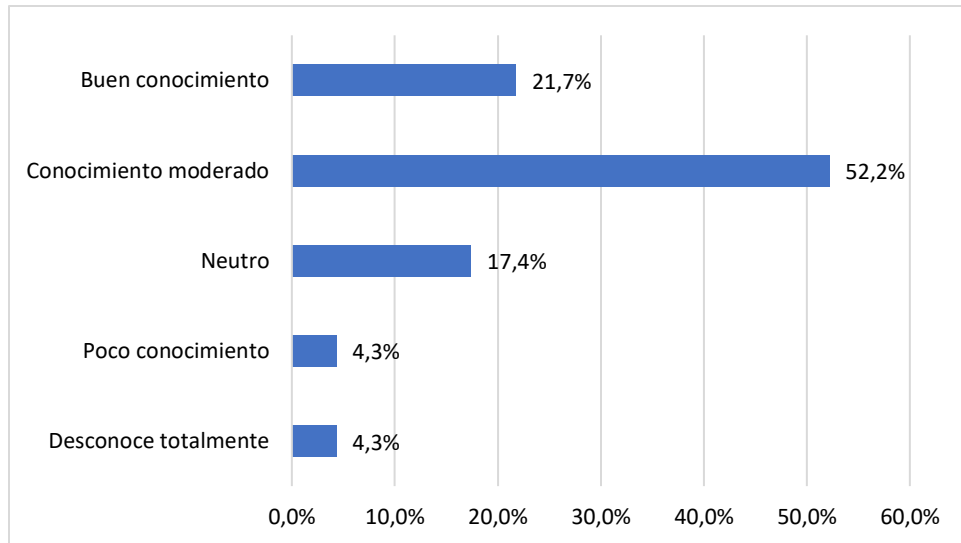
*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

En cuanto a la comunicación de las políticas, planes y medidas frente a la variabilidad y cambio climático por parte de la compañía hacia sus grupos de interés internos y externos, un 87% de los encuestados está de acuerdo, en tanto el 13%, principalmente personal de operaciones, está en desacuerdo con hacerlo. De igual manera este 87% se mantiene de acuerdo o totalmente de acuerdo, que la empresa haga parte de una agrupación local o regional para enfrentar los desafíos del cambio climático.

Finalmente, y como una opción de mejora, se puede observar que tan solo un 21.7% expresa tener buen conocimiento en temas para prevenir el cambio climático, 51% moderado y el resto entre poco, neutro o nulo (Figura 13).

**Figura 13**

*Capacidades internas en COMPAS Barranquilla para prevenir los efectos del cambio climático*



Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

### **7.1.2. Análisis DOFA**

El resultado del análisis DOFA, se presenta en la figura 14, así:

**Figura 14**

*Análisis DOFA puerto COMPAS Barranquilla, 2023*

	<b>DEBILIDADES</b>	<b>OPORTUNIDADES</b>	
<b>INTERNO</b>	<p>La gestión del cambio climático dentro de la compañía se resume en medidas de mitigación, sin embargo, los avances en las medidas de adaptación de los puertos no se identifican con claridad. Igualmente, no se evidencia implementación de normas ICONTEC como la ISO 14091:2021 Adaptación al cambio climático. (informe de gestión, 2022).</p> <p>Escaso conocimiento del personal sobre qué es, como afecta y las acciones que se puedan implementar dentro de los puertos para hacer frente al cambio climático. La falta de unidad en las respuestas, en el personal del puerto de Barranquilla, sobre posibles amenazas sobre el cambio climático. De igual manera se observó en algunas respuestas que el personal informó no contar con información suficiente. (encuesta 2023)</p> <p>Deficiente información relacionada con afectación a la infraestructura, la operatividad, el personal y/o la comunidad para procesar y permitir analizar tendencias que permitan tomar mejores decisiones e inversiones. (encuesta 2023)</p> <p>Falta de herramientas tecnológicas propias que permitan tener información en tiempo real y realizar proyecciones para la toma de decisiones. Desconocimiento en la manera de asegurar infraestructura, mercancía, y operaciones, específicamente ante eventos de cambio climático. (encuesta 2023)</p>	<p>Sello <b>Verde de Verdad</b>, etiqueta ambiental que recibió en 2022 gracias al enfoque de sostenibilidad en sus actividades y procesos, y su compromiso ambiental.</p> <p>Distinción por los últimos 10 años, por ser la única Red de Puertos Multipropósito de Colombia con 5 terminales en operación ubicados en Barranquilla, Buenaventura, y Tolú (informe de gestión 2022).</p> <p>Crecimiento de la mano con la calidad de vida de las comunidades vecinas de los terminales en operación y con la preservación del medio ambiente (informe de gestión 2022).</p> <p>Un alto porcentaje de los empelados encuestados (87%) de compas, considera importante comunicar políticas, planes y medidas a la comunidad (encuesta 2023)</p> <p>Contar con un diagnóstico reciente del sector a partir de la expedición del documento CONPES 4118 de 2023, el cual plantea estrategias y líneas de inversión para el impulso de este reglón económico y obliga a las entidades de nivel nacional, regional, departamental y municipal dejarlos incluidos en sus planes de inversiones.</p>	<b>EXTERNO</b>
	<b>FORTALEZAS</b>	<b>AMENAZAS</b>	
	<p>Expansiones de las facilidades graneleras en Tolú y Barranquilla, con lo cual se amplían las capacidades operativas (informe de gestión 2022).</p> <p>Diseño de procesos que aseguran el uso y consumo eficiente de recursos (agua y energía), así como el consumo responsable de bienes y servicios con un enfoque de economía circular. (informe de gestión 2022).</p> <p>La gestión ambiental orientada mediante la aplicación de un sistema, certificado bajo la norma ISO 14001:2015, que permite identificar, evitar, minimizar, y mitigar los posibles riesgos ambientales asociados a las operaciones de la Compañía. (informe de gestión 2022).</p> <p>Existencia de estrategia corporativa de mitigación que se orienta a identificar riesgos y generar soluciones asociados a las operaciones principalmente a través del impulso de iniciativas para la mitigación en el corto, medio y largo plazo. (informe de gestión 2022).</p> <p>Acuerdos firmados con la academia para obtener acompañamiento en el desarrollo de estudios de vulnerabilidad climática en los puertos de la compañía en los próximos años. (informe de gestión 2022).</p>	<p>Problemas de calado en Barranquilla (informe de gestión 2022).</p> <p>Fenómenos del Niño y La Niña y disminución de caudales (Ministerio de Ambiente, 2023).</p> <p>Diversas opiniones de líderes internacionales sobre el Cambio climático y la falta de acuerdos en el contexto nacional, regional y mundial</p> <p>Deficiente articulación en las políticas ambientales nacionales, regionales y locales.</p> <p>Desactualización o inexistencia de instrumentos de planeación que no permite tomar decisiones oportunas.</p> <p>Muy poca articulación entre las terminales que constituyen el puerto de Barranquilla que permita enfrentar el cambio climático de manera conjunta y fortalecida.</p> <p><i>Nota.</i> Fuente: Elaboración del autor (2023)</p>	

### 7.1.3. Análisis de variables meteorológicas asociadas al cambio climático

Para realizar un estudio de los patrones hidroclimáticos de la región de interés, se analizaron los datos de las estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y de la Dirección General Marítima (DIMAR). La base de datos incluye registros diarios de 5 variables meteorológicas: Temperatura (°C), Precipitación (mm), Nivel del mar (m), Nivel del río (m), y Sedimentos (kton/día) obtenidas de las estaciones de IDEAM, DIMAR, y Cormagdalena. Se muestra en la tabla 8, el intervalo de medición de cada variable, la cantidad de registros y el número de datos faltantes.

**Tabla 8**

*Registros de variables meteorológicas evaluadas*

Variable	Número de registros	Datos faltantes	Porcentaje de Representatividad	Fecha inicial	Fecha final	Entidad - Estación
Temperatura [°C]	47330	15274	67,73%	1983-01-01	2015-07-31	IDEAM – Las Flores
Precipitación [mm]	12799	3378	73,61%	1980-07-15	2015-07-30	IDEAM – Las Flores
Nivel del mar [m]	1844	25	98,64%	2017-12-14	2022-12-31	DIMAR – Las Flores
Nivel del río [m]	8366	11	99,87%	1996-01-01	2018-11-26	Cormagdalena - TEBSA
Sedimentos [kton/día]	15706	881	94,39%	1972-01-01	2014-12-31	IDEAM - Calamar

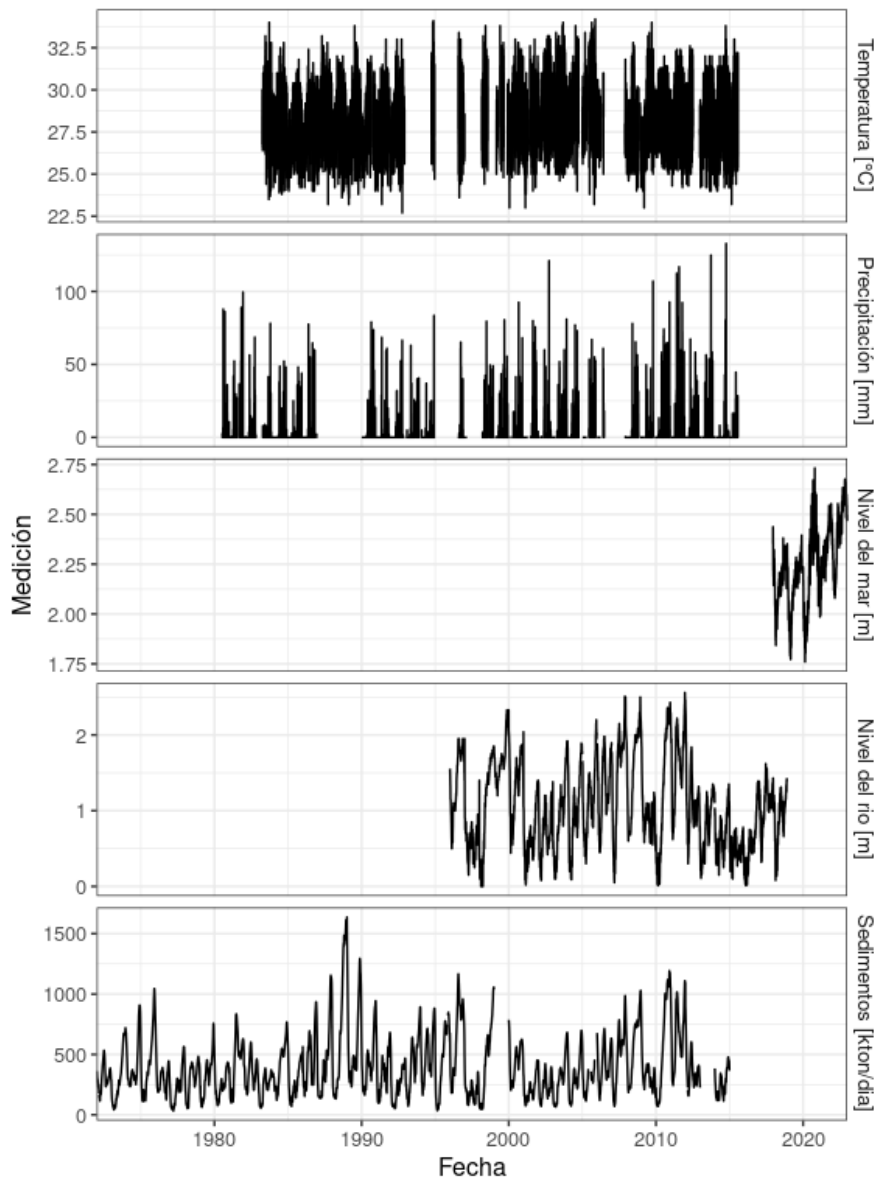
*Nota.* Fuente: Elaboración del autor según ISO/IEC 17025:2017 (2023)

La figura 15, muestra cinco series de tiempo correspondiente a los registros diarios entre 1980 y 2022 de las siguientes variables: Temperatura (°C), Precipitación (mm), Nivel del mar (m), Nivel del río (m), y Sedimentos (kton/día) a lo largo de varias décadas. El primer panel muestra la serie de tiempo de temperatura ambiente, esta señal oscila entre aproximadamente 25 y 35 grados Celsius y no muestra una tendencia clara a largo plazo. El segundo panel, correspondiente a la precipitación diaria, exhibe una variabilidad notable con picos que sugieren épocas de lluvia y

otras de sequía. El tercer panel muestra un incremento sostenido en los niveles del río a lo largo del tiempo. El cuarto panel, que mide el nivel del mar, revela una variabilidad más pronunciada, con ciclos de aumento y disminución que parecen tener una periodicidad de cinco años aproximadamente. Finalmente, el panel inferior, que registra los sedimentos, presenta picos destacados que podrían estar asociados a eventos concretos, como inundaciones, las cuales tienden a movilizar una mayor cantidad de sedimentos debido al incremento en la velocidad del agua y su capacidad de transporte.

### Figura 15

*Análisis por series de tiempo de variables hidroclimatológicas (años 1980 a 2022)*



*Nota:* La figura muestra las cinco series de tiempo de las variables hidroclimatológicas de temperatura ambiente, precipitación, nivel del mar, nivel del río y sedimentos. Fuente: Elaboración del autor (2023)

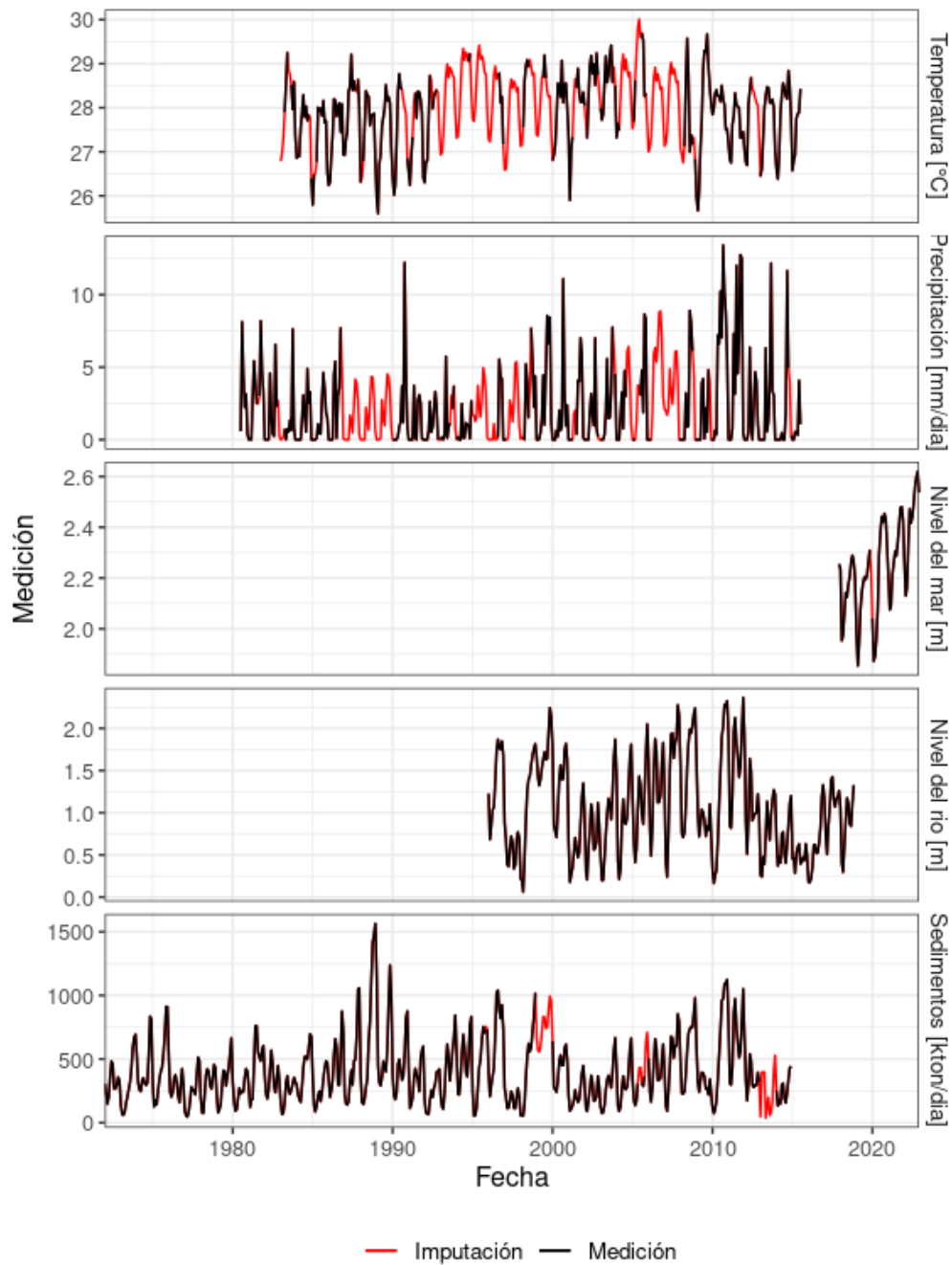
#### *Preprocesamiento de las bases de datos*

Se procesa la base de datos de las variables hidroclimatológicas diarias para resumir la información por mes. Para la serie de temperatura, se descartan los datos anteriores a 1983 porque presentan una varianza atípica, de menor magnitud que los datos de años subsiguientes, sugiriendo un posible cambio de ajuste en el instrumento de medición. Para el nivel del mar, se descartan los registros tomados cada 10 minutos que son menores o iguales a cero o mayores a diez metros. Luego, se invalidan las mediciones que exceden 2.69 metros entre el 12 de julio de 2018 a las 23:00 y el 13 de junio de 2020 a las 00:00, debido a indicios de recortes (clipping) en la señal del sensor. Del mismo modo, se invalidan lecturas superiores a 2.29 metros desde el 1 de enero de 2020, 05:00 horas, hasta el 29 de mayo de 2020, 20:00 horas. Las señales de precipitación, nivel del mar y sedimentos no presentan datos atípicos.

Consideramos que el resumen del registro por mes es representativo si al menos el 75% de sus datos son válidos; de lo contrario, se descarta el dato mensual y se registra un dato faltante. Posteriormente, mediante la técnica LOESS (Dancho, et al, 2023), se imputaron los datos faltantes, con el fin de mejorar la estimación de las estadísticas descriptivas anuales, como la media y la desviación estándar. La figura 16, muestra las series temporales desde 1980 hasta 2022, con líneas negras que indican las observaciones y líneas rojas que representan los datos imputados

**Figura 16**

*Series de tiempo mensual de las variables hidroclimatológicas*



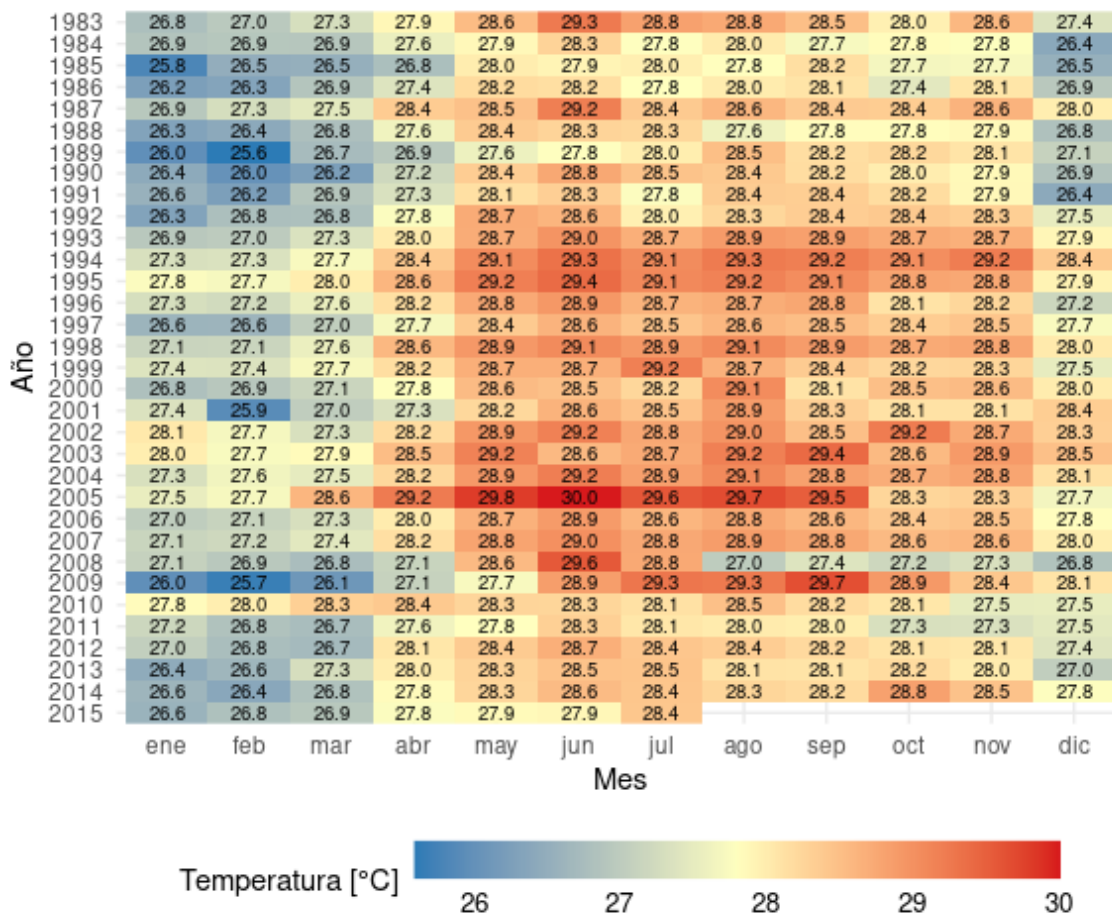
*Nota.* La línea negra representa la medición y la línea roja la imputación. Fuente: Elaboración del autor (2023)

### **7.1.3.1. Análisis descriptivo de temperatura.**

La figura 17 muestra el mapa de calor que representa los promedios mensuales de temperatura, donde las filas corresponden a los años desde 1983 hasta 2015, y las columnas representan los meses del año, de enero (ene) a diciembre (dic). Cada celda del mapa contiene un valor numérico que varía aproximadamente entre 26°C y 30°C, y los colores representan la escala que va desde el azul hasta el rojo, sugiriendo una variación en la temperatura de acuerdo a su magnitud. Las celdas azules indican los valores más bajos, mientras que las rojas representan los valores más altos. Luego, las celdas rojas muestran los meses más cálidos y las azules los más fríos. La tendencia general indica que hay un los meses centrales del año, entre abril y noviembre, que son los más cálidos, mientras que los meses de diciembre hasta marzo son los más fríos. Adicionalmente, se observa una intensificación del color rojo a medida que avanzan los años, lo que refuerza la idea de un aumento en las temperaturas durante estos meses. Por otro lado, los meses más fríos, indicados por tonos más azules y verdes en la parte inferior del mapa de calor, parecen mostrar menos variabilidad a través de los años, aunque todavía se puede percibir un ligero incremento en los valores con el tiempo.

**Figura 17**

*Mapa de calor de la temperatura promedio mensual*



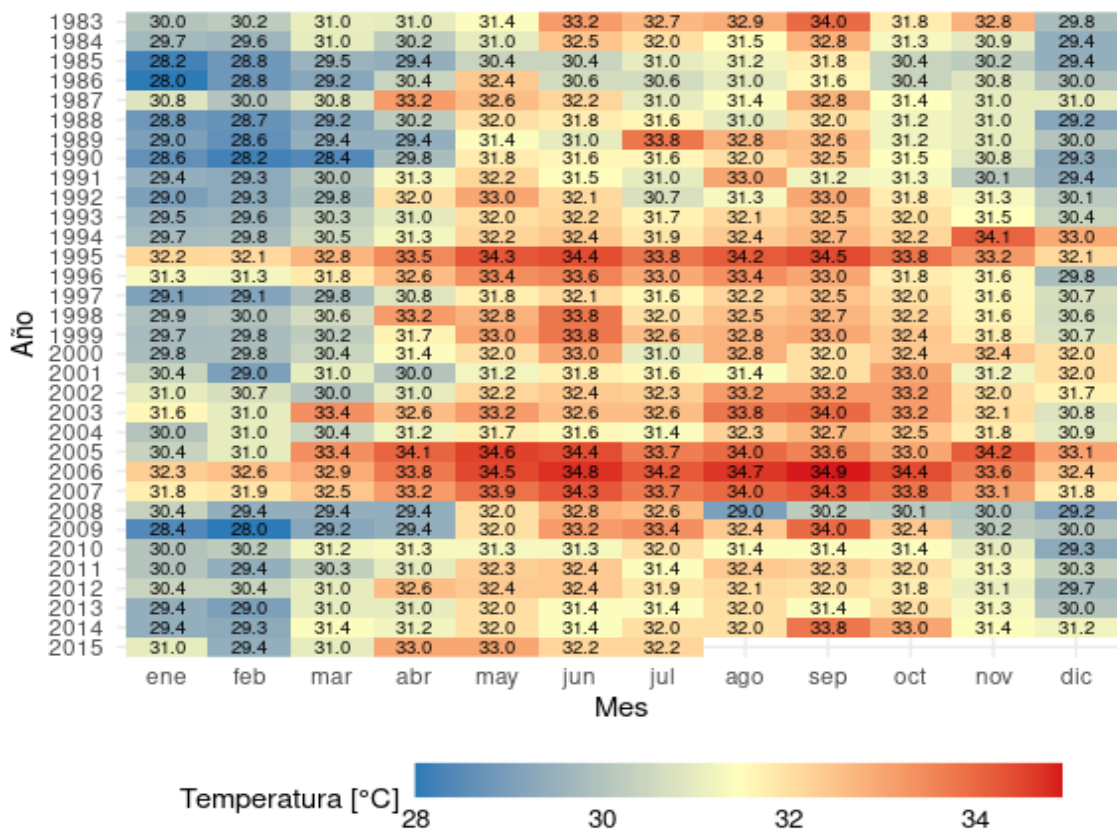
*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Con respecto a la temperatura máxima registrada, el mapa de calor de la temperatura máxima registrada para cada mes y año se presenta en la figura 18. Los tonos rojos reflejan temperaturas máximas más altas, mientras que los tonos azules señalan temperaturas máximas más bajas. Predominan los colores cálidos, lo que sugiere que las temperaturas máximas suelen ser elevadas a lo largo de todos los meses en los años representados. La consistencia en la intensidad de los colores por año indica variaciones mínimas en las temperaturas máximas durante esos periodos. Los meses de julio y agosto muestran una frecuente aparición de rojos oscuros, indicativo de que son los meses con temperaturas máximas más altas. Contrariamente,

enero y diciembre presentan principalmente tonos azules, lo que implica temperaturas máximas más bajas en esos meses. Las variaciones de temperatura entre años son notables. Por ejemplo, 1986 se distingue por una gama de colores más tenues, lo que apunta a temperaturas máximas menos extremas en comparación con 2006, donde predominan los tonos rojos intensos, reflejando temperaturas máximas considerablemente más altas.

**Figura 18**

*Mapa de calor de la temperatura máxima mensual*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Adicionalmente, en la figura 19 se representa la distribución de temperaturas entre los años 1983 y 2015. Cada año se representa con una línea horizontal, y la forma de cada línea indica cómo se distribuyeron las temperaturas durante ese año. En el eje horizontal, tenemos la temperatura en grados Celsius (°C), y en el eje vertical, el año correspondiente. Los colores

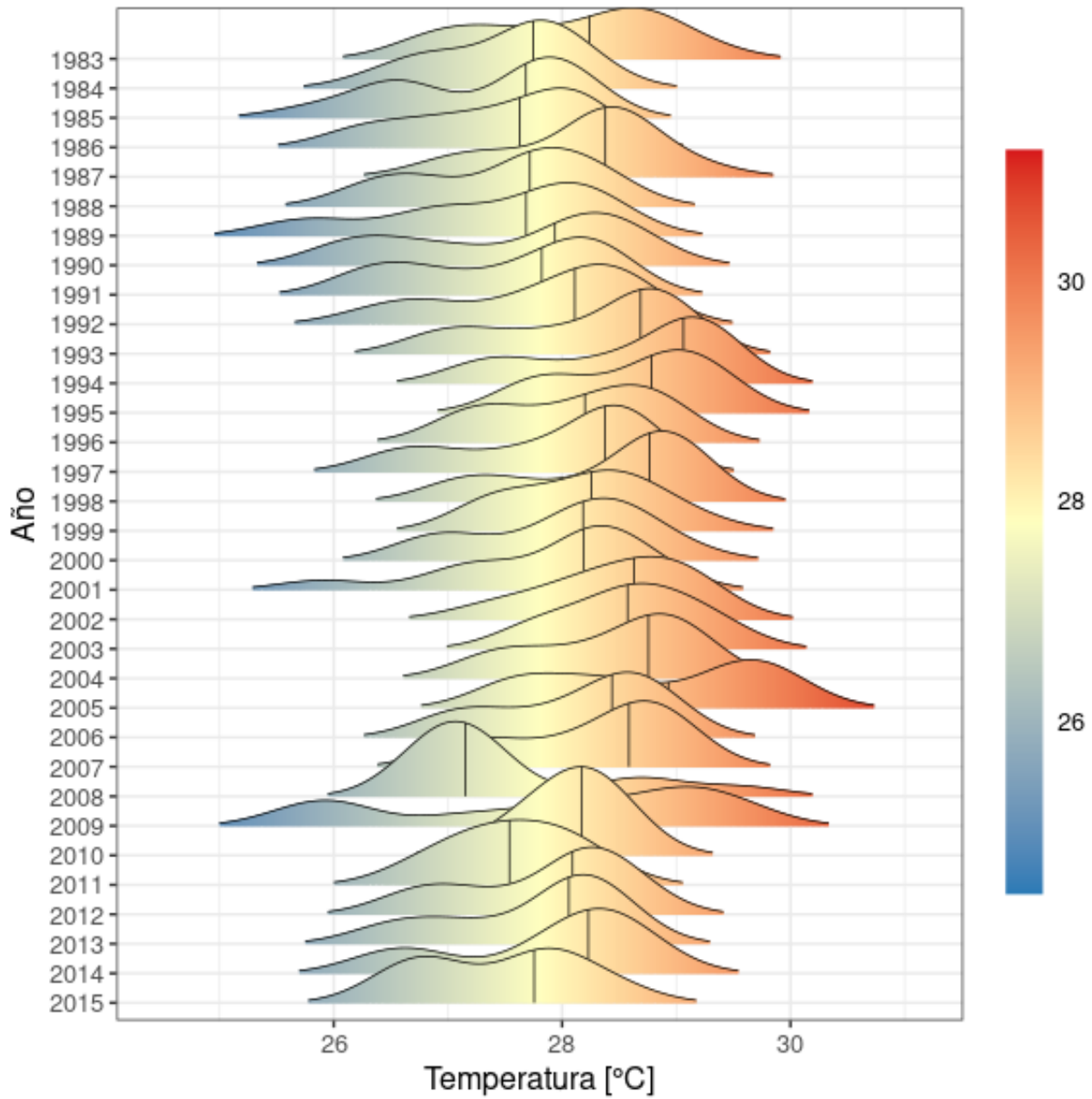
representan las temperaturas, con tonos azules para temperaturas bajas y tonos rojos para temperaturas altas.

Se nota la temperatura varía de un año a otro, con algunas distribuciones más anchas que otras, lo que sugiere cambios en la consistencia de las temperaturas a lo largo de los años. En cada año, se observa que las distribuciones son bimodales, que se evidencia por la presencia de dos picos distintos en una misma curva de distribución de temperatura. Esto sugiere que hubo dos rangos de temperatura especialmente comunes en esos años. La bimodalidad indica que hubo temporadas con temperaturas altas y bajas dentro del mismo año, siendo más comunes las temperaturas altas, como se refleja en altura de cada distribución.

De manera similar, se observa en la **figura 20** la distribución de temperaturas apiladas por mes. En este caso, cada mes se representa con una línea horizontal, y la forma de cada línea indica cómo se distribuyeron las temperaturas durante ese mes. En junio a septiembre, notamos que las temperaturas tienden a ser más altas en comparación con los meses de noviembre a marzo. Esto se evidencia por el desplazamiento de la mediana en cada distribución. El cambio gradual de colores de púrpura a amarillo indica que hay una variación estacional en la que los meses de verano experimentan temperaturas más altas, lo que es consistente con un patrón climático típico en muchas regiones. La altura y el año de las distribuciones indican la variabilidad y la concentración de las temperaturas medidas: una banda amplia sugiere una mayor variabilidad, mientras que una banda estrecha indica que las temperaturas estuvieron más concentradas alrededor de la media.

**Figura 19**

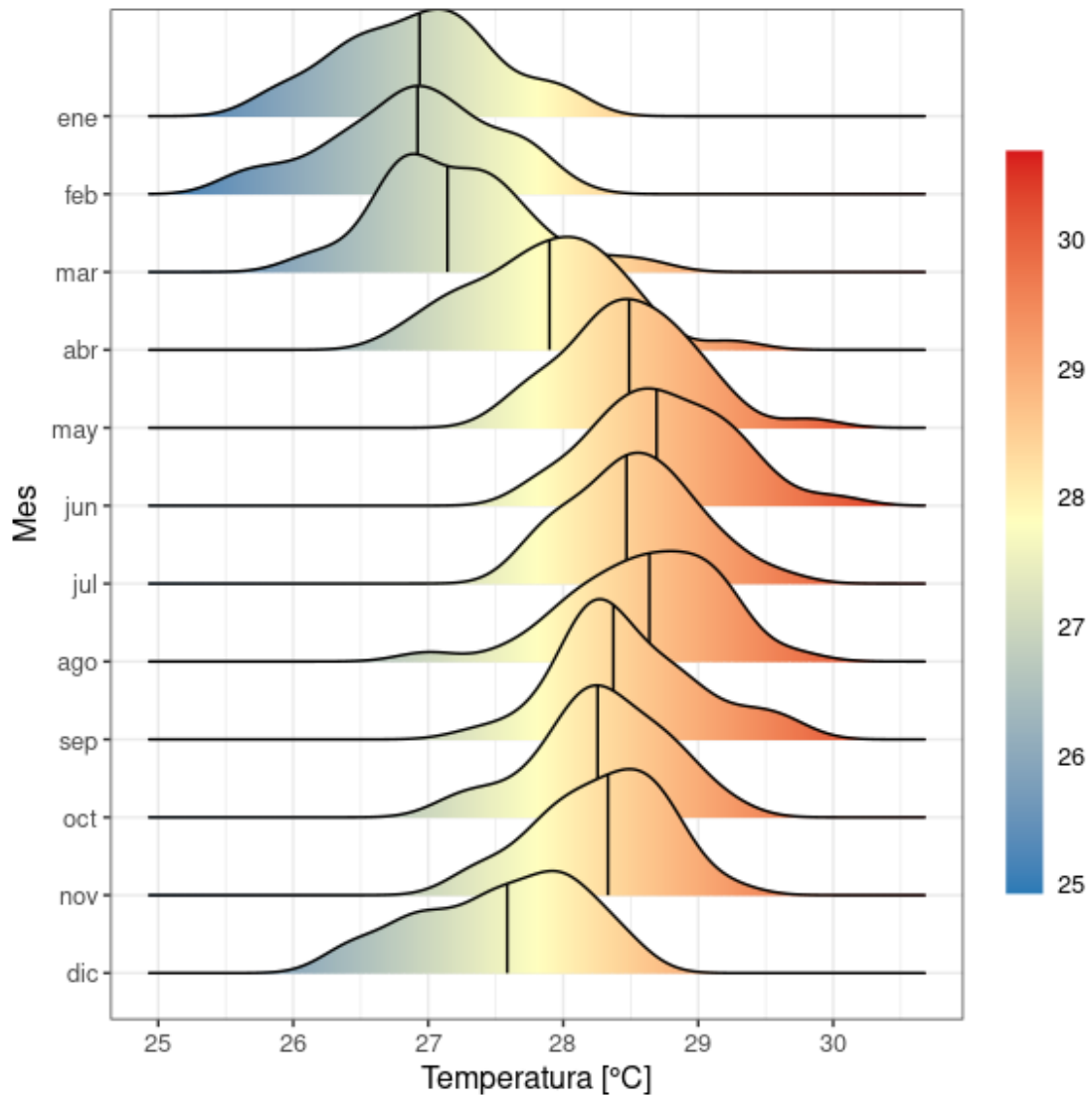
*Distribución de densidad de la temperatura por año*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

**Figura 20**

*Distribución de densidad de la temperatura por mes*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

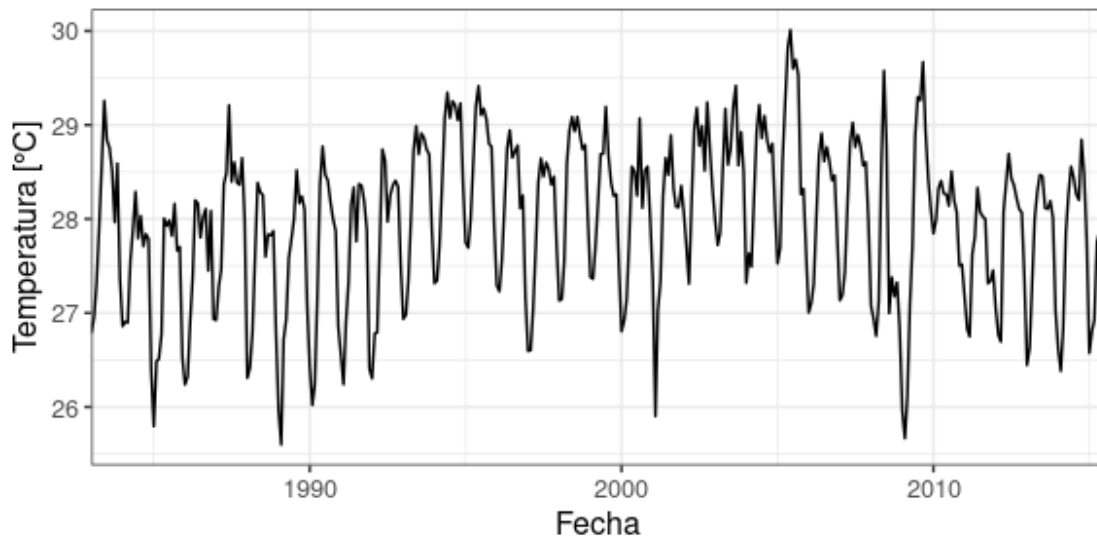
#### **7.1.3.1.1. Modelo analítico de temperatura.**

La figura 21 muestra la serie de tiempo de temperatura en grados Celsius desde 1983-01-01 hasta 2015-07-01. Durante este período, la temperatura varió en un rango entre 25.6 y 30 °C. No se evidencia una tendencia clara de aumento o disminución a lo largo de los 30 años, pero la tendencia parece no lineal, especialmente en los años más recientes, donde se observa un descenso notable en las temperaturas. Además, se presentan oscilaciones regulares, lo que

sugiere un comportamiento cíclico, posiblemente debido a cambios estacionales. Los picos máximos de temperatura se registraron en los años más recientes, mientras que los valores más bajos se observan en intervalos dispersos a lo largo del periodo representado.

**Figura 21**

*Serie de tiempo de temperatura ambiente entre 1983 y 2015*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La tabla 9 presenta los resultados de las pruebas de normalidad (Prueba de Shapiro-Wilks) y estacionariedad (Prueba de Dickey-Fuller) aplicadas a la serie de tiempo de temperatura. La prueba de normalidad indica que la serie de tiempo no sigue una distribución normal ( $p - \text{valor} < 0.05$ ). En cambio, los resultados de la prueba de estacionariedad indican que la serie es estacionaria ( $p - \text{valor} < 0.05$ ), lo que significa que, según esta prueba, la media y la varianza de la serie se mantienen constantes a lo largo del tiempo.

**Tabla 9**

*Pruebas de normalidad y estacionariedad para la serie de tiempo de temperatura*

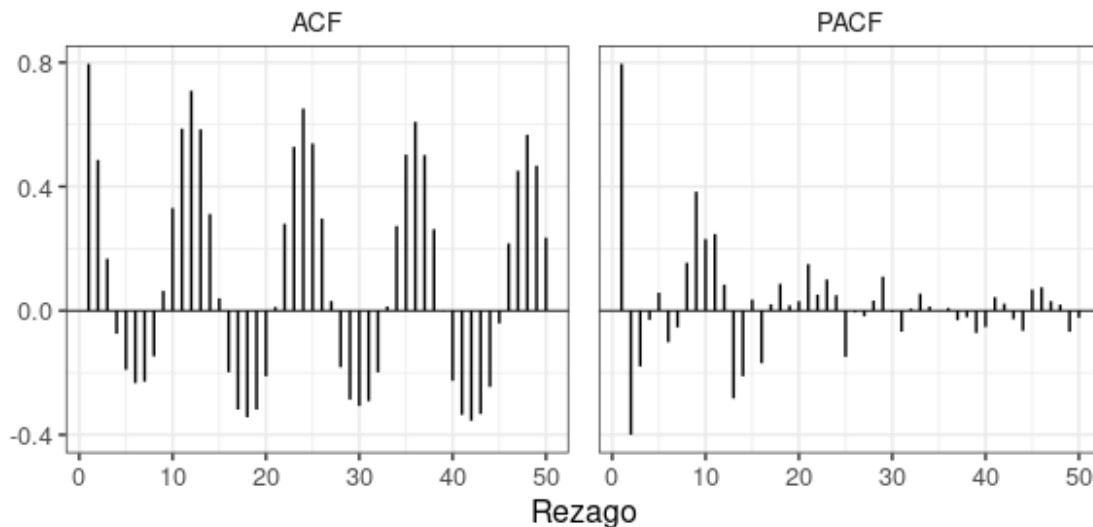
Prueba	p-valores
Normalidad (Shapiro-Wilks)	0.00
Estacionariedad (Dickey-Fuller)	0.01

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor, 2023

Para examinar la autocorrelación en la serie de tiempo, se calcularon la función de autocorrelación (ACF) y la función de autocorrelación parcial (PACF) que se muestran en la figura 22. La función ACF muestra correlaciones significativas a intervalos regulares, específicamente en rezagos de 12 meses, lo que sugiere una fuerte periodicidad anual en la serie. Esto implica que la temperatura de un mes está relacionada con la del mismo mes en años anteriores. Por otro lado, la PACF muestra correlaciones significativas en los primeros rezagos y luego se atenúan, lo cual es indicativo de características autorregresivas en la serie temporal.

**Figura 22**

*Autocorrelación y autocorrelación parcial para la serie de tiempo de temperatura*



*Nota.* Función de autocorrelación (ACF), función de autocorrelación parcial (PACF). Fuente: Elaboración del autor (2023)

Así mismo, se ajusta un modelo ARIMA(3,1,2) a la serie, con el valor más bajo de AIC siendo de 468. El modelo matemático se representa como:

$$(1 - 0.8275B - 0.5408B^2 + 0.8607B^3)\nabla x_t = (1 - 0.8292B - 0.6871B^2 + 0.8510B^3)w_t$$

Aquí,  $x_t$  es la serie de tiempo,  $w_t$  es la componente de ruido blanco y  $B$  es el operador de rezago. A partir de este modelo, se examina la independencia de los residuos mediante la prueba de Ljung-Box, cuyos resultados respaldan la independencia de los mismos ( $p$  - valor  $> 0.05$ ). Adicionalmente, la prueba de Jarque-Bera revela que los residuos no siguen una distribución normal ( $p$  - valor  $< 0.05$ ). Los resultados de estas pruebas están detallados en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Pruebas de independencia y normalidad para los residuos del modelo ajustado a la serie de tiempo de temperatura*

Prueba	p-valores
Independencia de residuos (Ljun-Box)	0.43
Normalidad de residuos (Jarque-Bera)	0.00

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

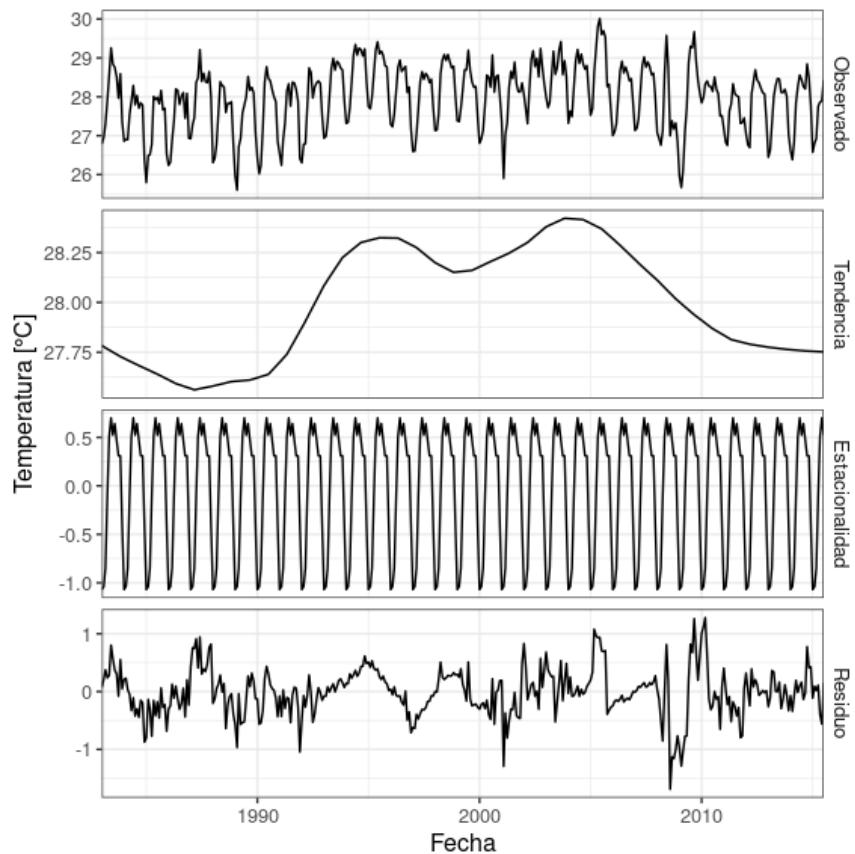
En este contexto, realizamos una descomposición de la serie de tiempo de temperatura en componentes de tendencia, estacionalidad y ruido blanco, representados como  $X_t = T_t + S_t + \epsilon_t$  (Figura 23). Para ello, se utiliza el método de descomposición STL (Seasonal and Trend decomposition using Loess, por sus siglas en inglés) (Cleveland et al, 1990). Se detecta una tendencia ascendente en la serie de tiempo de temperatura, lo que sugiere un incremento inicial de la temperatura, luego, se presenta un descenso reciente en los últimos años. La componente estacional exhibe un patrón definido y cíclico, correspondiente a las variaciones estacionales (ciclo de 12 meses). Por último, la componente de residuo ilustra fluctuaciones aleatorias que oscilan en torno a la línea de tendencia y la estacionalidad, sin seguir un patrón predecible.

Se observa una elevación moderada en la tendencia de la temperatura durante los primeros 15 años, seguida por una disminución en los últimos 5 años. Para evaluar la significancia

estadística de estos cambios, se lleva a cabo un análisis de varianza (ANOVA). Este análisis prueba la hipótesis de que las medias anuales de temperatura son consistentes a lo largo de los años. La hipótesis nula establece que todas las medias anuales son iguales ( $H_0 : \mu_{año_1} = \dots = \mu_{año_n}$ ), mientras que la hipótesis alternativa sugiere que al menos una media anual es distinta ( $H_1 : \mu_{año_1} \neq \dots \neq \mu_{año_n}$ ). La prueba arroja un  $p$  - valor  $< 0.05$ , lo cual indica diferencias significativas en la media de la temperatura entre los años. Por ende, se rechaza la hipótesis nula, confirmando que ha habido un cambio significativo en la temperatura a lo largo de los años estudiados. Los detalles de estos resultados se presentan en la tabla 11. La variabilidad en la distribución de las temperaturas por año se ilustra en la figura 24.

**Figura 23**

*Descomposición STL de la serie de tiempo de temperatura*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

**Tabla 11**

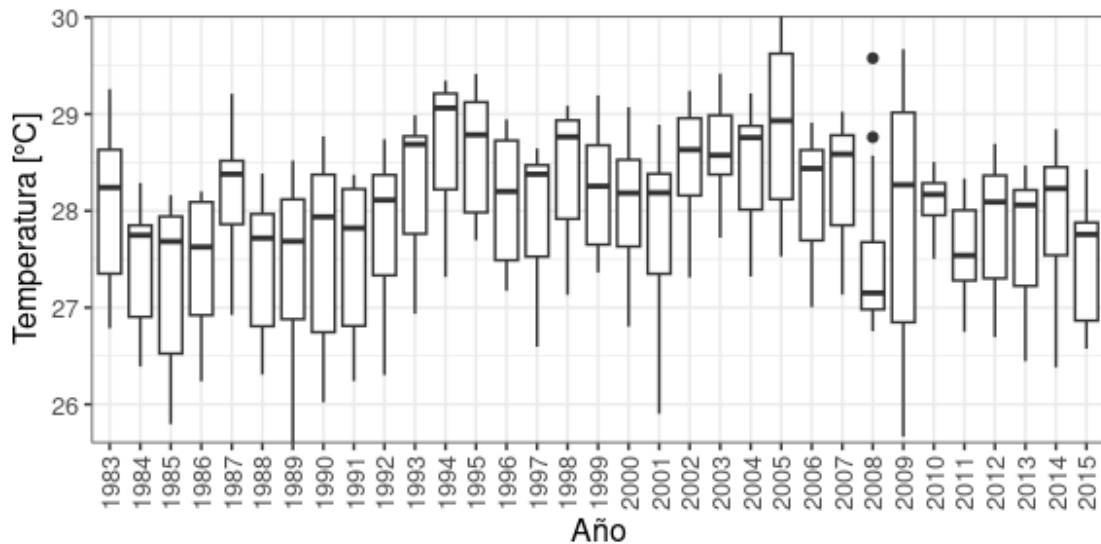
*Prueba de hipótesis para determinar si la media de la temperatura es igual en todos los años.*

Término	Grado de libertad	Suma cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Año	32	65.69	2.05	3.52	0.00
Residuos	358	208.74	0.58	-	-

Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

**Figura 24**

*Diagrama de cajas de la temperatura por año*



Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

La prueba Student-Newman-Keuls (SNK) se aplicó para determinar las diferencias estadísticamente significativas entre los promedios anuales de temperatura. Según esta prueba, los años se han clasificado en grupos basados en la similitud de sus promedios. La clasificación resultante se presenta en la Tabla 12. Por ejemplo, el grupo denominado “abcd” incluye los años 1983, 1987, 1992, 1993, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2004, 2006, 2007, 2009, 2010, 2012, 2013, y 2014, indicando período de estabilidad térmica. Aunque los grupos identificados por la prueba SNK son distintos, la variación en la temperatura media entre los grupos es menor

a un grado Celsius, sugiriendo pequeñas variaciones en las temperaturas medias a lo largo del período estudiado.

**Tabla 12**

*Clasificación de años por grupos con medias similares de temperatura*

Año	Temperatura media [°C]	Grupo	Año	Temperatura media [°C]	Grupo
1983	28.1	abcd	2000	28.0	abcd
1984	27.5	bcd	2001	27.9	abcd
1985	27.3	d	2002	28.5	abc
1986	27.5	bcd	2003	28.6	ab
1987	28.2	abcd	2004	28.4	abcd
1988	27.5	bcd	2005	28.8	a
1989	27.4	cd	2006	28.1	abcd
1990	27.6	bcd	2007	28.3	abcd
1991	27.5	bcd	2008	27.5	bcd
1992	27.8	abcd	2009	27.9	abcd
1993	28.2	abcd	2010	28.1	abcd
1994	28.6	ab	2011	27.6	bcd
1995	28.6	ab	2012	27.9	abcd
1996	28.1	abcd	2013	27.8	abcd
1997	27.9	abcd	2014	27.9	abcd
1998	28.4	abcd	2015	27.5	bcd
1999	28.2	abcd			

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Se aplicó la fórmula de tasa de variación porcentual ( $TV$ ) para analizar el cambio anual en la temperatura. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$TV = \left( \frac{\bar{x}_t - \bar{x}_{t-1}}{\bar{x}_{t-1}} \right) \times 100 [\%]$$

Las tasas de cambio en la temperatura durante el período analizado son aproximadamente del 1%, sugiriendo un cambio mínimo (Tabla 13). El cambio más notable se detectó entre los

años 1986 y 1987, donde la temperatura promedio aumentó un 2.6% en comparación con el año anterior. Este incremento representa la mayor tasa de variación anual dentro del conjunto de datos presentados.

**Tabla 13**

*Tasas de variación anual para la temperatura*

<b>Años comparativos</b>	<b>Tasa de variación (%)</b>	<b>Años comparativos</b>	<b>Tasa de variación (%)</b>
1983 - 1984	-2.0	1999 - 2000	-0.6
1984 - 1985	-0.8	2000 - 2001	-0.4
1985 - 1986	0.7	2001 - 2002	2.1
1986 - 1987	2.6	2002 - 2003	0.4
1987 - 1988	-2.4	2003 - 2004	-0.6
1988 - 1989	-0.4	2004 - 2005	1.4
1989 - 1990	0.6	2005 - 2006	-2.4
1990 - 1991	-0.1	2006 - 2007	0.5
1991 - 1992	1.0	2007 - 2008	-2.6
1992 - 1993	1.5	2008 - 2009	1.4
1993 - 1994	1.4	2009 - 2010	0.6
1994 - 1995	0.0	2010 - 2011	-1.9
1995 - 1996	-1.7	2011 - 2012	1.1
1996 - 1997	-0.8	2012 - 2013	-0.4
1997 - 1998	1.7	2013 - 2014	0.4
1998 - 1999	-0.8	2014 - 2015	-1.5

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

### **7.1.3.2. Análisis descriptivo de precipitación.**

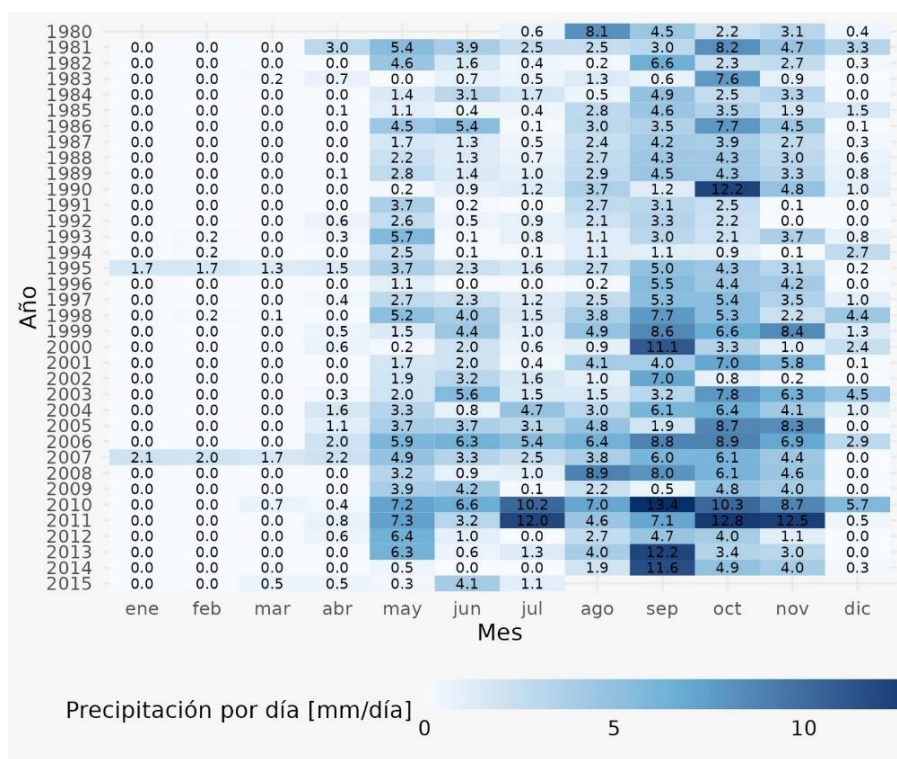
En la figura 25, se presenta el mapa de calor de la frecuencia de días lluviosos y secos clasificados por mes y año. Se considera un día como lluvioso o húmedo cuando la precipitación

excede 1 mm. La frecuencia mensual de lluvia solo se representa para aquellos meses cuyos registros válidos superan el 75% del total anual. Un porcentaje menor al 75% en los registros válidos de un mes se traduce en un dato faltante, marcado con gris oscuro. El gradiente de azules ofrece una escala visual de la frecuencia de días lluviosos, con tonos más intensos que indican una mayor cantidad de días de lluvia y el color blanco que señala los días secos. Los datos faltantes aparecen en gris claro. El eje horizontal muestra el rango de años desde 1980 hasta 2015, mientras que el eje vertical presenta los meses de enero a diciembre.

La figura 26 revela meses con una frecuencia elevada de lluvia, particularmente de mayo a noviembre, contrastando con la menor frecuencia de días húmedos de diciembre a abril. Aquí sobresale octubre con el mes que presenta más días con precipitación y enero como el menor. Además, se nota variabilidad anual en la frecuencia de lluvia, destacando el año 2010 como el más lluvioso, con 116 días de lluvia, en comparación con el año más seco, 2006, que registró solo 7 días lluviosos. Las áreas blancas sugieren periodos más secos o una reducción general en las precipitaciones. La presencia de líneas horizontales en gris claro a lo largo de todos los meses indica años con datos faltantes significativos.

**Figura 25**

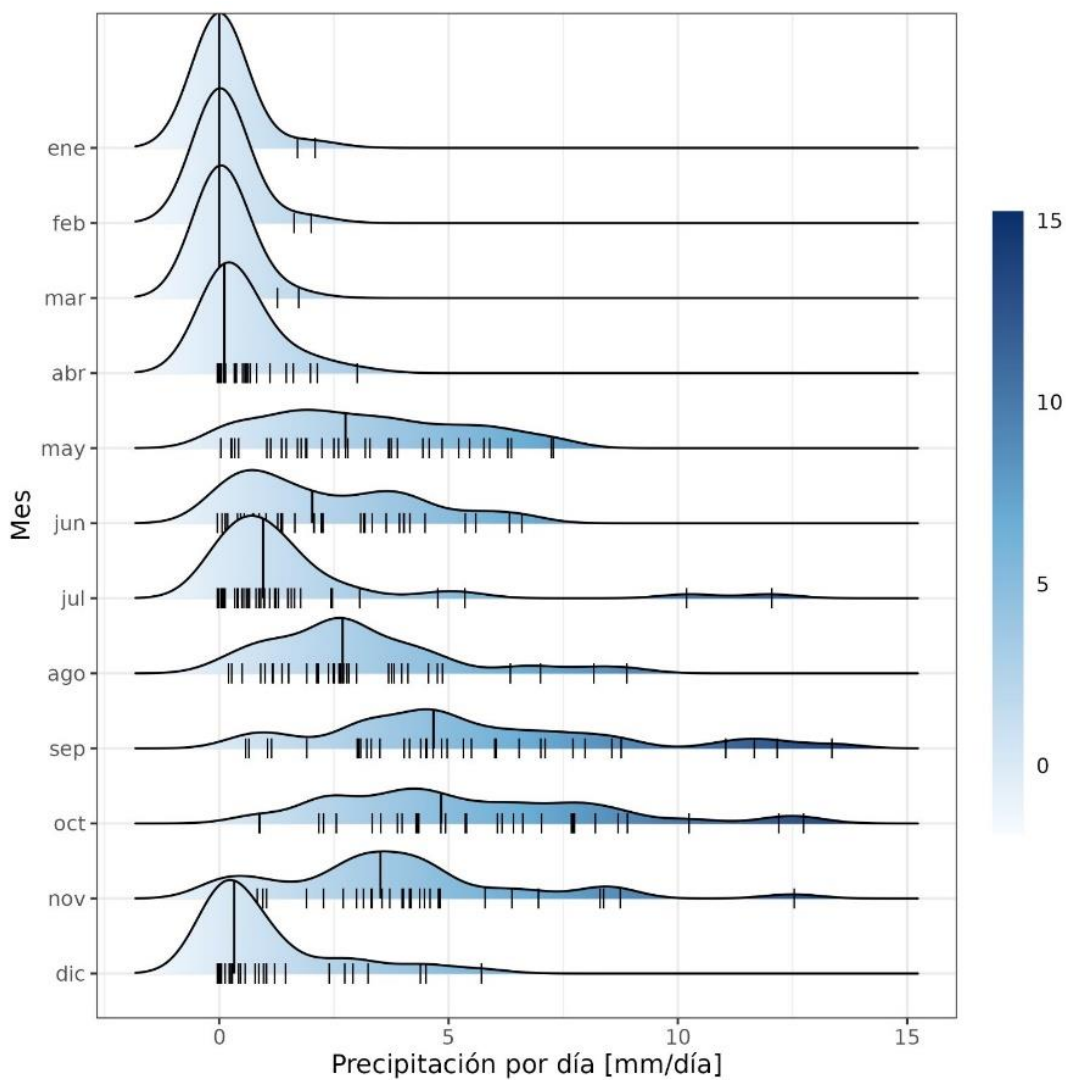
*Mapa de calor de la frecuencia de precipitación por año y mes*



Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

**Figura 26**

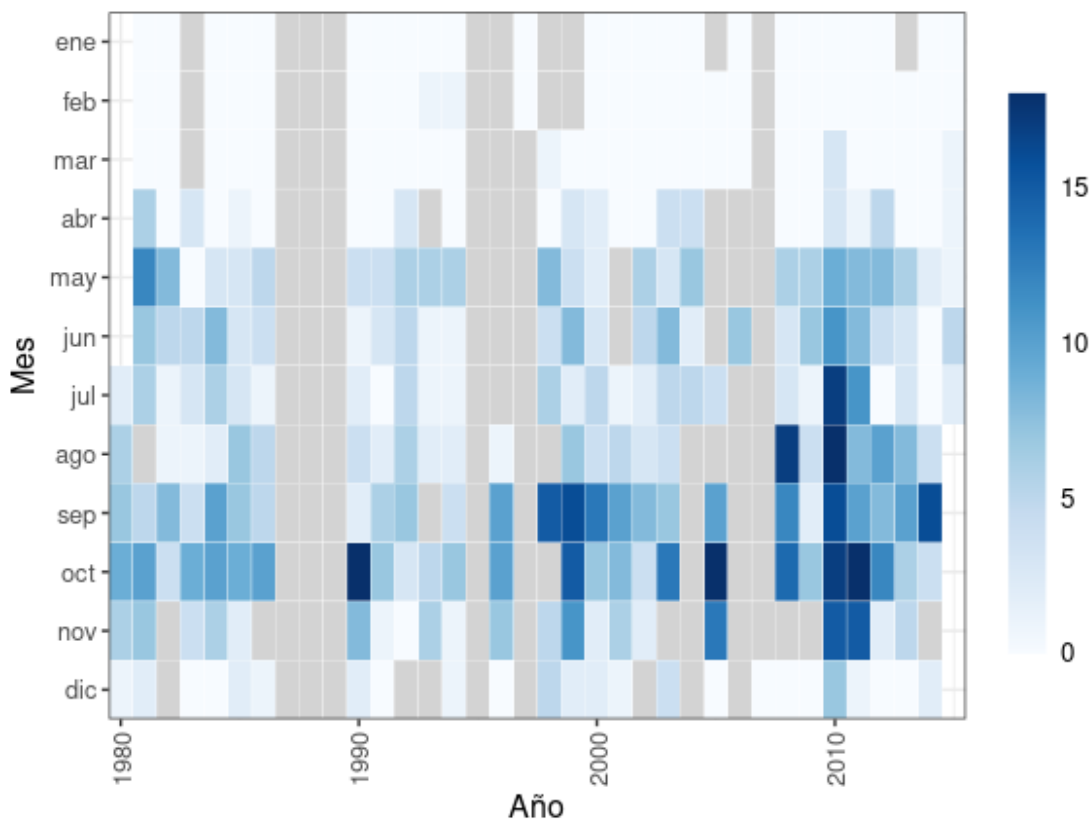
*Distribución de densidad de la precipitación por mes*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

**Figura 27**

*Mapa de calor de la frecuencia de días con más de 1 mm de precipitación por año y mes.*



Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

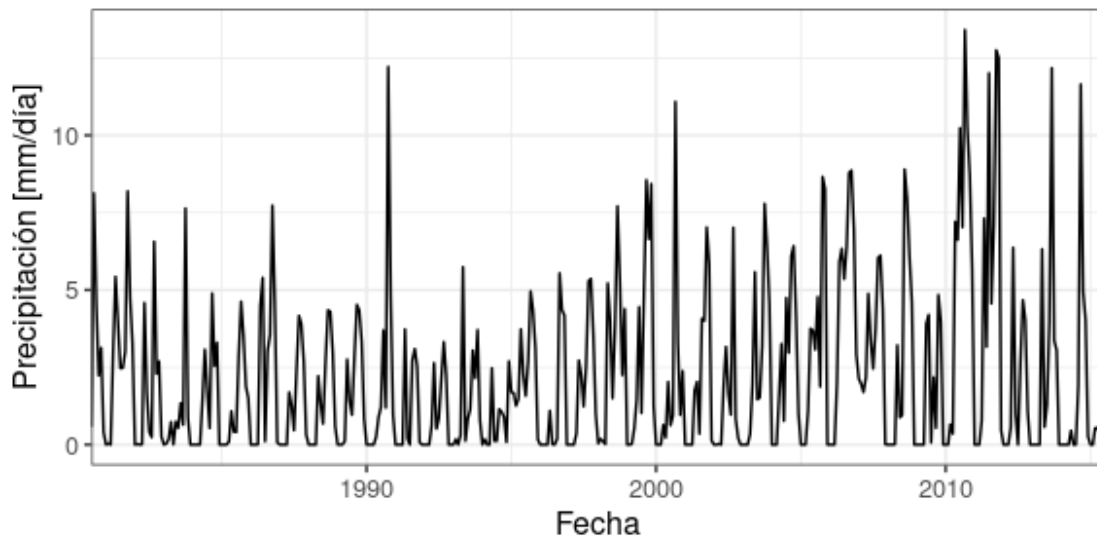
#### **7.1.3.2.1. Modelo analítico de precipitación.**

La figura 28 presenta la evolución de la precipitación diaria promedio en milímetros desde 1980-07-01 hasta 2015-07-01. Durante este intervalo, la precipitación varía entre 0 y 13.4 mm día<sup>-1</sup>. Es notable la variabilidad en la precipitación, con picos pronunciados que señalan días de lluvias intensas. Esta variabilidad es distinta según los años, indicando estaciones o años de diferente intensidad. El periodo 2005 - 2011 destaca por varios picos de fuerte precipitación, sugiriendo eventos o estaciones lluviosas más activas. Los años más lluviosos son 2010 y 2011. Posteriormente, desde 2015, la precipitación muestra menor intensidad y variabilidad, posiblemente indicando un periodo de más sequía. Estas tendencias pueden relacionarse con fenómenos como El Niño o La Niña, que influyen en los patrones de lluvia a nivel global. Por

ejemplo, un año El Niño podría reducir las precipitaciones en ciertas áreas mientras que las aumenta en otras.

**Figura 28**

*Serie de tiempo de precipitación*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La tabla 13 muestra los resultados obtenidos de aplicar pruebas estadísticas sobre la secuencia temporal de precipitación. Mediante la Prueba de Shapiro-Wilks se evalúa la normalidad, indicando que la serie no se ajusta a una distribución normal dado  $p - \text{valor} < 0.05$ . Por otro lado, la Prueba de Dickey-Fuller determina la estacionariedad, con un  $p - \text{valor} < 0.05$ , lo que confirma que la serie temporal es estacionaria, implicando que su promedio y dispersión permanecen constantes a lo largo del tiempo. Esta relación parece incongruente, dado que la serie tiene comportamiento intermitente.

**Tabla 14**

*Pruebas de normalidad y estacionariedad para la serie de tiempo de precipitación*

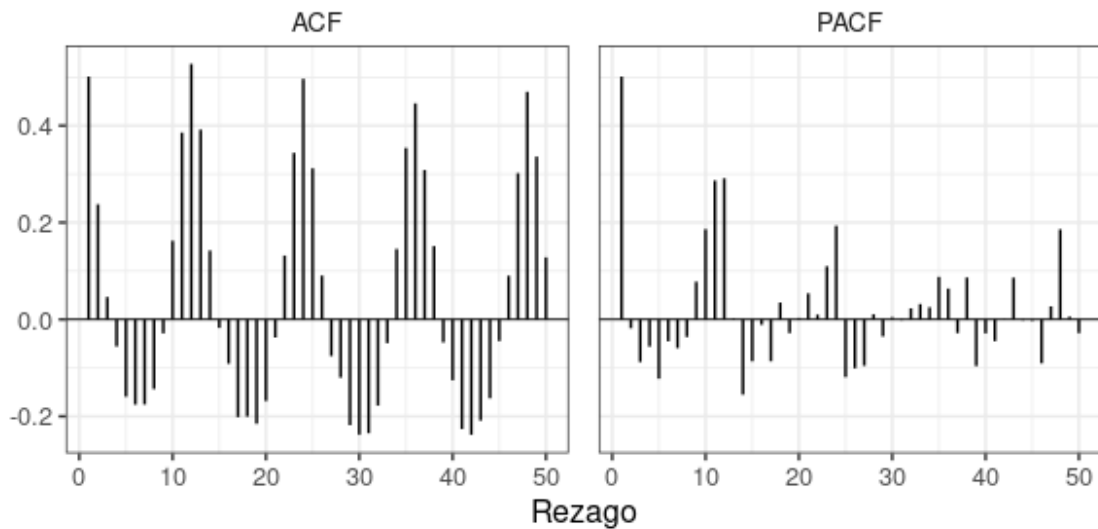
<b>Prueba</b>	<b>p-valores</b>
Normalidad (Shapiro-Wilks)	0.00
Estacionariedad (Dickey-Fuller)	0.01

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La figura 29 muestra la Función de Autocorrelación (ACF) y la Función de Autocorrelación Parcial (PACF) para una serie de tiempo del promedio mensual de la precipitación por día. En la ACF, se observan correlaciones positivas y negativas que alternan y se extienden en los rezagos. Sin embargo, no hay un patrón claro de disminución que sugiera una influencia autorregresiva, (disminución exponencial). La PACF muestra valores significativos en los rezagos 11 y 12, lo cual indica un comportamiento periódico de periodicidad anual.

**Figura 29**

*Autocorrelación y autocorrelación parcial para la serie de tiempo de precipitación*

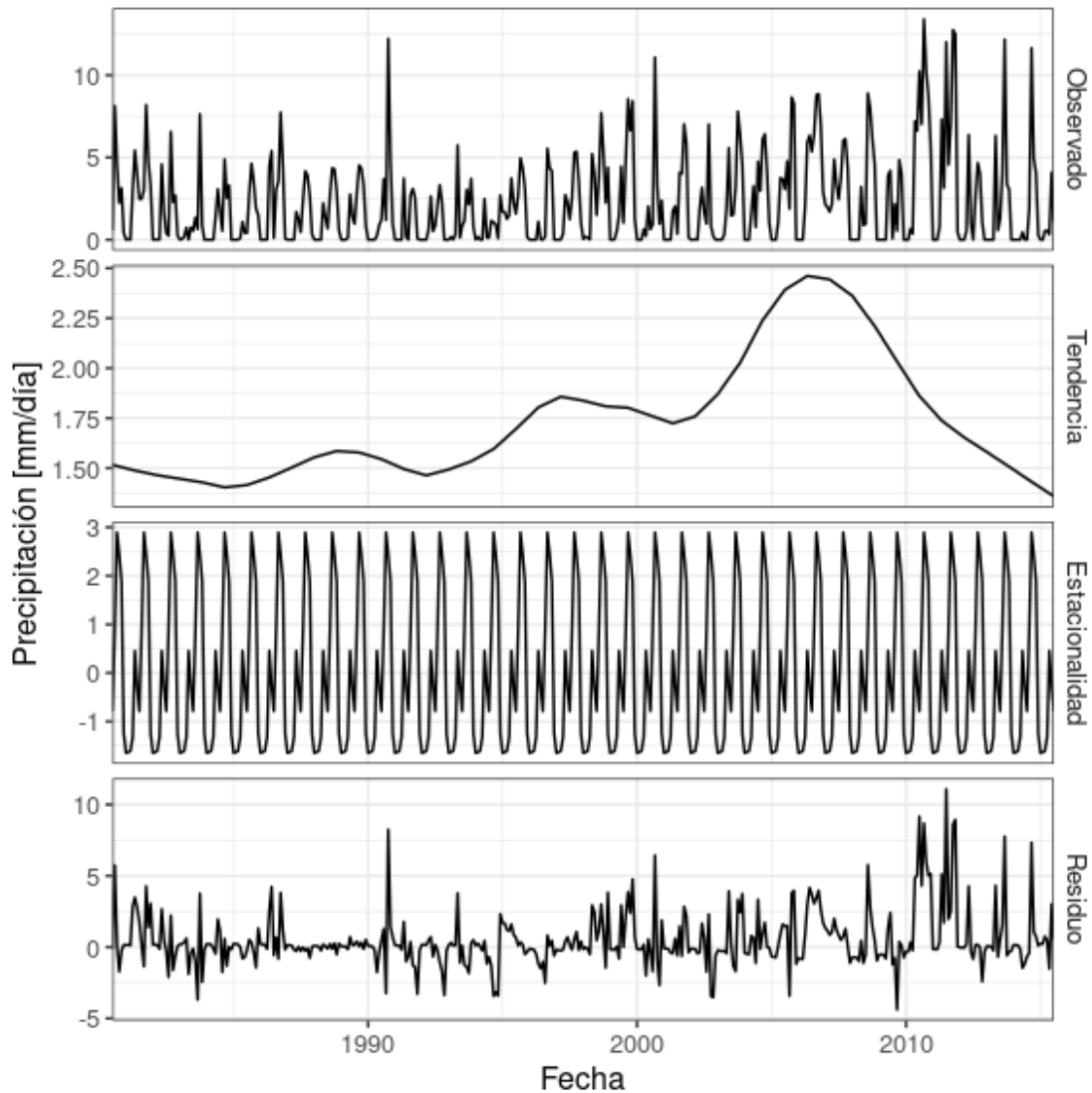


*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Basado en los resultados obtenidos, no es apropiado adaptar un modelo autorregresivo debido a las propiedades observadas en las series de tiempo. En su lugar, se ha procedido con una descomposición STL, como se muestra en la figura 30. Esta descomposición revela un aumento en la precipitación desde el año 2005 hasta el 2013, seguida por una disminución hasta el 2020, lo que podría atribuirse a variaciones climáticas o alteraciones en los patrones de lluvia a nivel regional. Se identifica un patrón estacional recurrente, caracterizado por intervalos de lluvias intensas y períodos más secos a lo largo del año. Las fluctuaciones residuales, que no se vinculan directamente con la tendencia ni con la estacionalidad, pueden ser el resultado de eventos meteorológicos inusuales o influencias ambientales locales. La evidencia de estacionalidad apunta a que la región experimenta períodos definidos de lluvias y sequías.

**Figura 30**

*Descomposición STL de la serie de tiempo de precipitación.*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Para evaluar la diferencia estadística de las fluctuaciones observadas, se ha llevado a cabo un análisis de varianza (ANOVA). Este análisis tiene como objetivo determinar si existe una variabilidad significativa en las medias anuales de precipitación. Bajo la hipótesis nula, se asume que las medias anuales no presentan diferencias significativas ( $H_0 : \mu_{año_1} = \dots = \mu_{año_n}$ ). En contraste, la hipótesis alternativa sugiere que existe al menos un año con una media de precipitación significativamente distinta ( $H_1 : \mu_{año_1} \neq \dots \neq \mu_{año_n}$ ). Dado que el  $p$  – valor  $< 0.05$ , los resultados indican variaciones significativas en la media de precipitación

entre los años. Así, se descarta la hipótesis nula y se infiere un cambio significativo en la precipitación media con el tiempo (Tabla 15). Las diferencias anuales de precipitación se visualizan claramente en el diagrama de cajas de precipitaciones (Figura 31).

**Tabla 15**

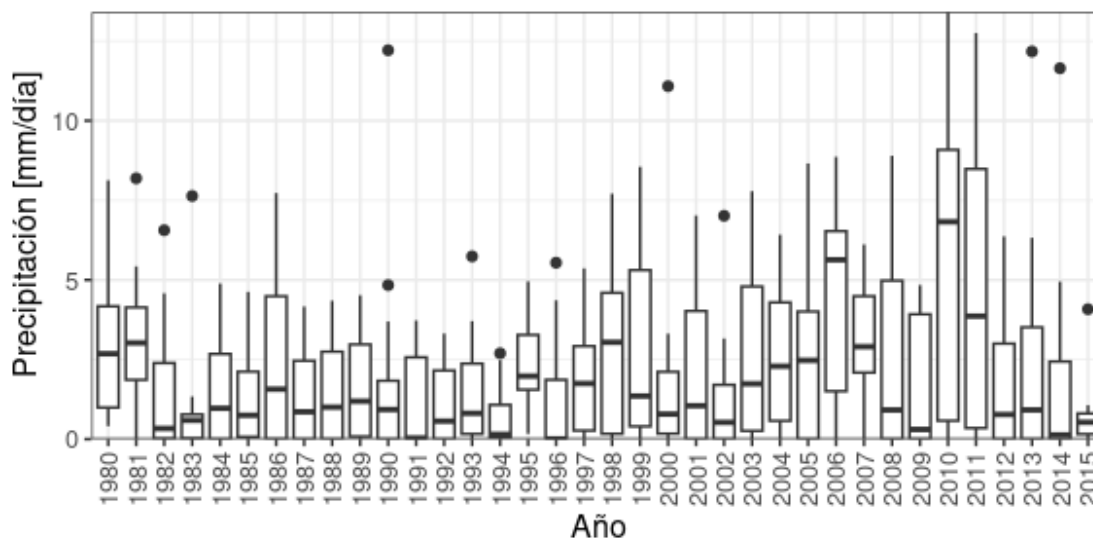
*Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de la serie de tiempo de precipitación.*

Término	Grado de libertad	Suma cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
<b>Año</b>	35	533.31	15.24	2.22	0.00
<b>Residuos</b>	385	2,638.73	6.85	-	-

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

**Figura 31**

*Diagramas de cajas de la precipitación por año*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La prueba de Student-Newman-Keuls (SNK) se aplicó para identificar diferencias significativas entre las medias anuales de precipitación diaria anuales. Esta técnica clasifica los años en categorías basadas en la similitud de sus medias. La tabla 16 muestra las categorías resultantes. El grupo 'a', que incluye únicamente el año 2010, han registrado la media de precipitación más elevada. Los años asociados con el grupo 'bc' presentan las medias más bajas de precipitación durante el período estudiado. Los años que pertenecen al grupo 'abc' muestran valores

intermedios de precipitación. Por último, el año 1994, que forma parte del grupo 'c' indica el menor valor de precipitación diaria.

**Tabla 16**

*Grupos de años con medias similares*

Año	Precipitación media (mm/día)	Grupo	Año	Precipitación media (mm/día)	Grupo
1980	3.2	abc	1998	2.9	abc
1981	3.0	abc	1999	3.1	abc
1982	1.6	bc	2000	1.8	bc
1983	1.1	bc	2001	2.1	abc
1984	1.5	bc	2002	1.3	bc
1985	1.4	bc	2003	2.7	abc
1986	2.4	abc	2004	2.6	abc
1987	1.4	bc	2005	2.9	abc
1988	1.6	bc	2006	4.5	abc
1989	1.8	bc	2007	3.2	abc
1990	2.1	abc	2008	2.7	abc
1991	1.0	bc	2009	1.6	bc
1992	1.0	bc	2010	5.8	a
1993	1.5	bc	2011	5.1	ab
1994	0.7	c	2012	1.7	bc
1995	2.4	abc	2013	2.6	abc
1996	1.3	bc	2014	1.9	bc
1997	2.0	abc	2015	0.9	bc

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Se utilizó la ecuación de tasa de variación porcentual (*TV*) para evaluar las fluctuaciones anuales en la temperatura. La fórmula aplicada es:

$$TV = \left( \frac{\bar{x}_t - \bar{x}_{t-1}}{\bar{x}_{t-1}} \right) \times 100 [\%]$$

La tabla 17 muestra las tasas de cambio anuales en la precipitación diaria media desde 1980 hasta 2015. Los registros demuestran variaciones significativas en la precipitación. Por ejemplo,

se observa un incremento notable del 256.1% entre 2009 y 2010 y un aumento del 107.9% entre 2002 y 2003. En contraste, se reportan disminuciones marcadas, como la caída del -66.5% entre 2011 y 2012 y la del -51.8% entre 2014 y 2015. Además, hay años con cambios menores, como el decremento del -5.3% entre 2003 y 2004 y el ascenso del 13.5% entre 2004 y 2005. La tendencia general subraya una alta variabilidad en la precipitación anual, destacando la dinámica compleja y cambiante de los patrones de lluvia a lo largo de los años.

**Tabla 17**

*Tasa de variación anual para la precipitación*

<b>Años comparativos</b>	<b>Tasa de variación (%)</b>	<b>Años comparativos</b>	<b>Tasa de variación (%)</b>
1980 - 1981	-3.7	1998 - 1999	7.6
1981 - 1982	-48.9	1999 - 2000	-40.4
1982 - 1983	-32.1	2000 - 2001	13.6
1983 - 1984	37.6	2001 - 2002	-37.6
1984 - 1985	-6.5	2002 - 2003	107.9
1985 - 1986	76.7	2003 - 2004	-5.3
1986 - 1987	-41.6	2004 - 2005	13.5
1987 - 1988	13.2	2005 - 2006	52.1
1988 - 1989	10.7	2006 - 2007	-27.2
1989 - 1990	19.5	2007 - 2008	-16.2
1990 - 1991	-51.2	2008 - 2009	-39.6
1991 - 1992	-0.2	2009 - 2010	256.1
1992 - 1993	46.4	2010 - 2011	-13.5
1993 - 1994	-51.4	2011 - 2012	-66.5
1994 - 1995	230.5	2012 - 2013	50.9
1995 - 1996	-46.9	2013 - 2014	-24.3
1996 - 1997	58.0	2014 - 2015	-51.8
1997 - 1998	42.4		

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

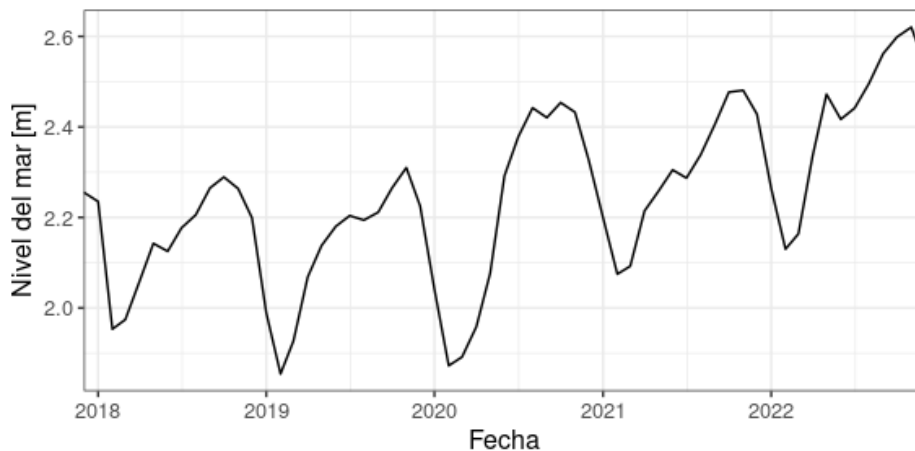
### 7.1.3.3. Análisis de nivel del mar.

La medición del nivel del mar permite calcular los efectos del cambio climático en el planeta, y proyectar futuros escenarios de las zonas costeras, razón por la cual, en este estudio, aunque la terminal de COMPAS Barranquilla se encuentra sobre el río Magdalena, la desembocadura de este se encuentra a tan solo 9.5 kilómetros de distancia del puerto y se constituye en la entrada principal de las motonaves que se reciben. Adicionalmente, se presenta un fenómeno llamado cuña marina cuando el nivel del río es más bajo que el del mar y sucede a la altura de Bocas de Ceniza. La serie de datos que entregó la DIMAR no fue suficiente para realizar un análisis de correlación entre el nivel del mar y el nivel del río, sin embargo, se realizó el análisis de esta variable como se lee a continuación:

La figura 32 muestra la serie de tiempo del nivel del mar en metros desde 2017-12-01 hasta 2022-12-01. Durante este periodo, el nivel del mar varía en un rango entre 1.9 y 2.6 m. Después de 2020, se percibe un aumento en la frecuencia de picos altos, sugiriendo posibles episodios regulares de niveles elevados del mar. Estas variaciones podrían deberse a fenómenos climáticos como El Niño o La Niña y asociados al aumento en la temperatura del agua del mar en zonas tropicales.

**Figura 32**

*Serie de tiempo de nivel del mar*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La tabla 18 presenta los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilks para normalidad y de Dickey-Fuller para la estacionariedad aplicada a la serie de tiempo de nivel del mar. De acuerdo a los resultados, los datos poseen una distribución normal ( $p - \text{valor} > 0.05$ ) y que la serie es estacionaria ( $p - \text{valor} < 0.05$ ).

**Tabla 18**

*Pruebas de normalidad y estacionariedad para la serie de tiempo de nivel del mar*

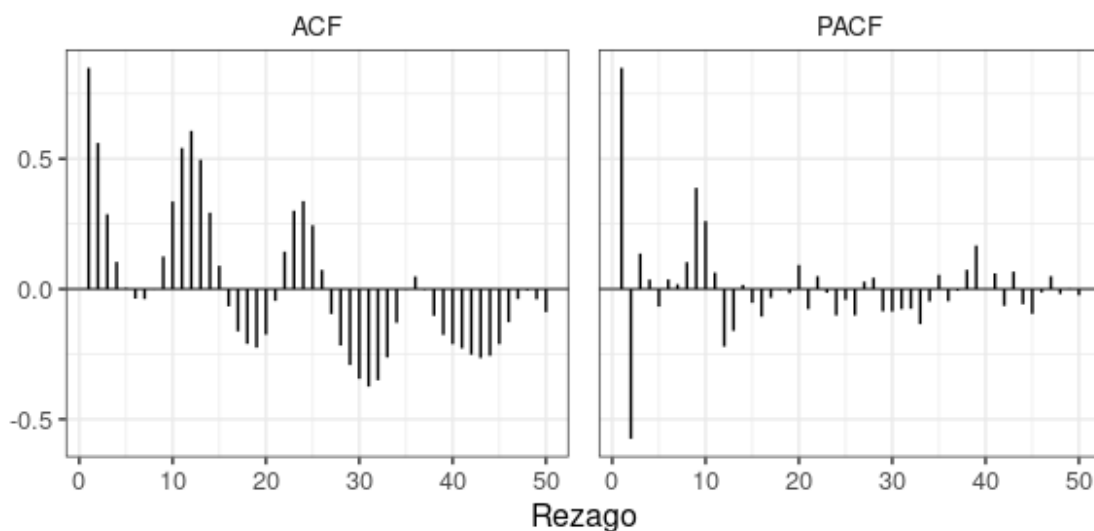
Prueba	p-valores
Normalidad (Shapiro-Wilks)	0.58
Estacionariedad (Dickey-Fuller)	0.02

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La figura 33 muestra las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) para la serie de tiempo de nivel del mar. La ACF exhibe correlaciones significativas en los primeros rezagos que disminuyen progresivamente, lo que sugiere una dependencia autorregresiva en la serie. Las correlaciones se mantienen hasta el rezago 50 aproximadamente. La PACF muestra picos significativos en rezagos aislados, lo que indica que solo ciertos rezagos pasados tienen una influencia directa en el valor actual. Estos patrones pueden sugerir que un modelo autorregresivo (ARIMA) podría ser apropiado para modelar la serie de tiempo.

**Figura 33**

*Autocorrelación y autocorrelación parcial para la serie de tiempo de nivel del mar.*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Se ajusta un modelo ARIMA (1,1,3) a la serie, con el valor más bajo de AIC siendo de -136. El modelo matemático se representa como:

$$(1 - 0.4703B)\nabla x_t = (1 + 0.0753B - 0.3308B^2 - 0.5244B^3)w_t$$

En este escenario,  $x_t$  representa la serie temporal,  $w_t$  es el componente de ruido aleatorio y  $B$  es el operador de rezago. Se emplea la prueba de Ljung-Box para evaluar la independencia de los residuos, la cual confirma dicha independencia ( $p - \text{valor} > 0.05$ ). Adicionalmente, la prueba de Jarque-Bera indica que los residuos no tienen una distribución normal ( $p - \text{valor} < 0.05$ ). Los detalles de estas pruebas se encuentran en la tabla 19.

**Tabla 19**

*Resultados de las pruebas de independencia y normalidad de los residuos del modelo ARIMA ajustado a la serie de tiempo de precipitación*

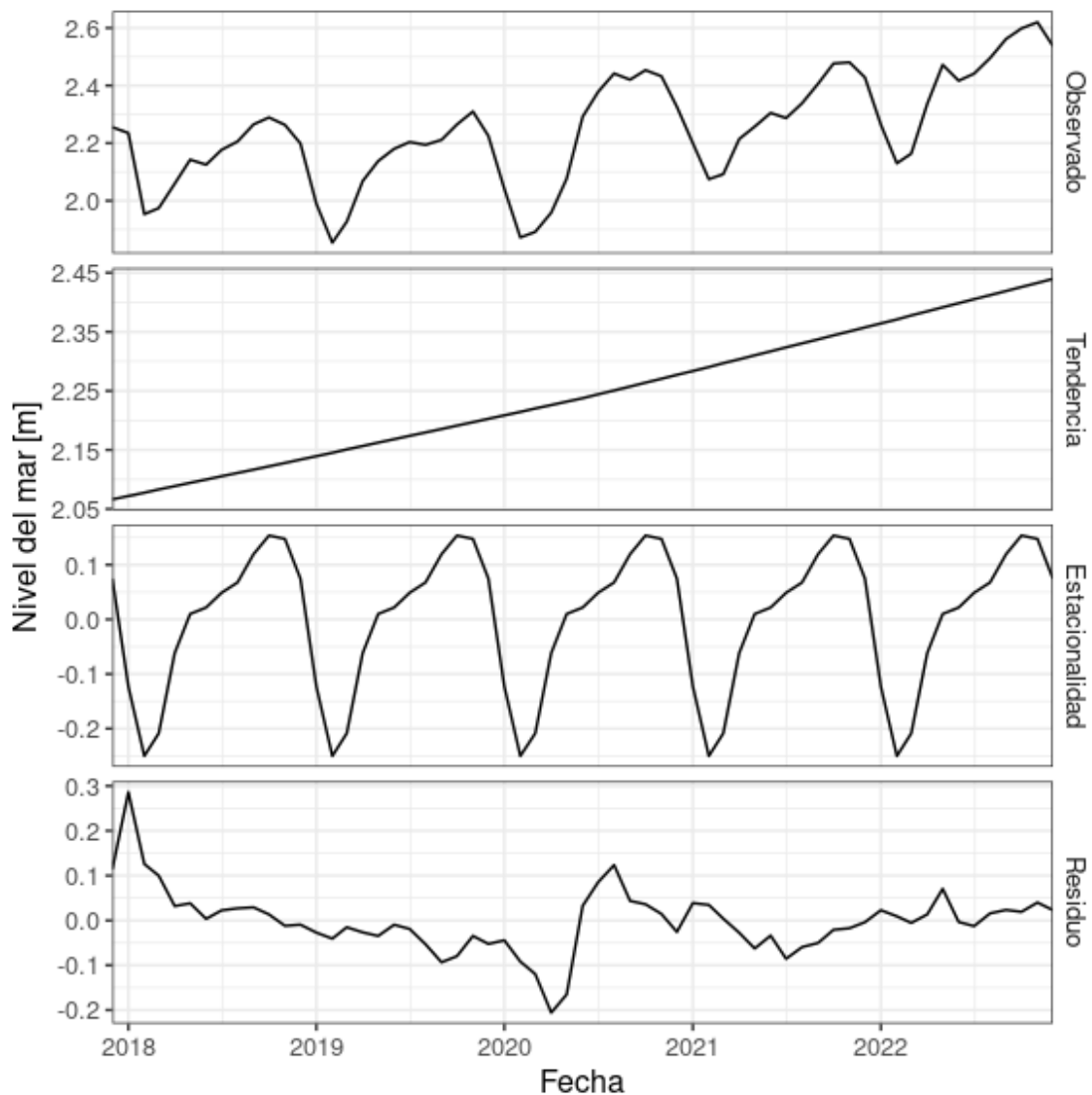
Prueba	p-valores
Independencia de residuos (Ljun-Box)	0.84
Normalidad de residuos (Jarque-Bera)	0.00

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La figura 34 muestra la descomposición STL de la serie de tiempo del nivel del mar. El panel superior presenta los datos observados y muestra variabilidad a lo largo del tiempo. El segundo panel revela una tendencia ascendente constante desde 2018 hasta 2022, sugiriendo un aumento gradual en el nivel del mar. El tercer panel indica una estacionalidad con fluctuaciones regulares a lo largo de cada año, manteniendo una amplitud constante. El cuarto panel, de residuos, muestra las diferencias entre los datos observados y los componentes estimados de la tendencia y la estacionalidad; estos residuos oscilan alrededor de cero con algunas desviaciones notables en momentos específicos. El patrón de aumento en el nivel del mar podría estar asociado con factores ambientales globales como el cambio climático.

**Figura 34**

*Descomposición STL de la serie de tiempo de nivel del mar*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Para averiguar si las variaciones en los promedios anuales en el nivel del mar son significativas, se realiza un ANOVA (Tabla 20). Este método evalúa si existe una diferencia significativa entre las medias del nivel del mar de año en año. La hipótesis nula postula que no hay variación en las medias anuales del nivel del mar ( $H_0 : \mu_{año_1} = \dots = \mu_{año_n}$ ), en contraste con la hipótesis alternativa que plantea que al menos un año difiere en su media ( $H_1 : \mu_{año_1} \neq \dots \neq \mu_{año_n}$ ). El valor de  $p$  - valor  $< 0.05$  indica que hay variaciones significativas en la media del nivel del mar para al menos uno de los años analizados con un 5 % de

significancia. Así, se rechaza la hipótesis nula, llegando a la conclusión de que existe, al menos, un promedio anual diferente a los demás, como se muestra en la tabla anexa al análisis ANOVA. Las variaciones por año están detalladas en la figura correspondiente a la presentación de diagramas de cajas (figura 35).

**Tabla 20**

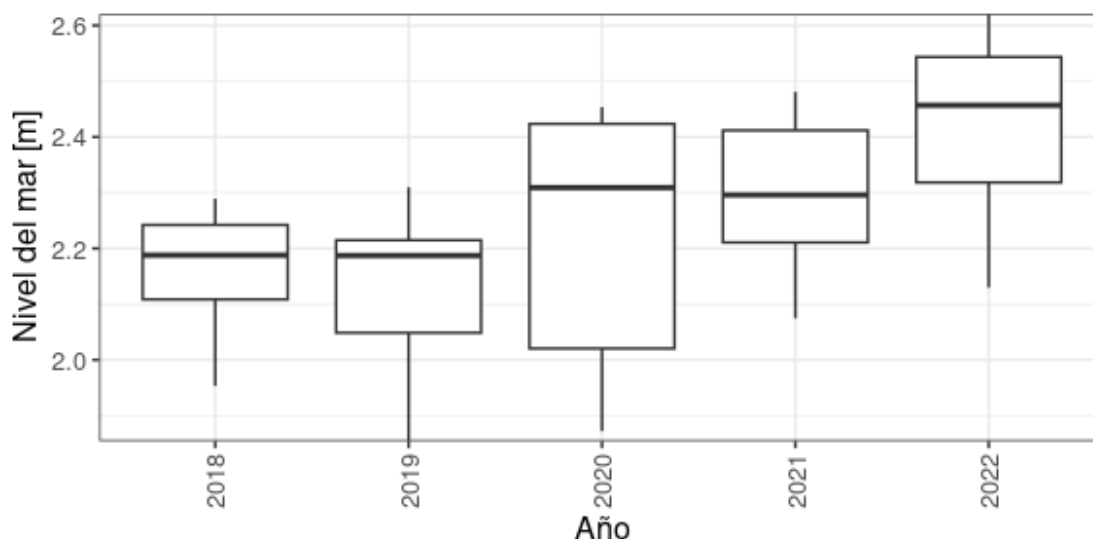
*Análisis de varianza de los registros de nivel del mar por año*

<b>Término</b>	<b>Grado de libertad</b>	<b>Suma cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>Año</b>	4	0.66	0.16	6.30	0.00
<b>Residuos</b>	55	1.44	0.03	-	-

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

**Figura 35**

*Diagramas de cajas del nivel del mar por año*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La tabla 21 muestra las observaciones del nivel medio del mar para diferentes años, desde 2018 hasta 2022. En este período, el nivel del mar ha variado entre 2.1 m y 2.4 m. Específicamente, entre el 2018 y 2020, el nivel del mar se mantuvo estable aproximadamente a un valor de de 2.2 m. Posteriormente, se observa un incremento gradual, alcanzando 2.3 m en 2021 y 2.4 m en 2022. Durante estos años, los niveles del mar se clasificaron en los grupos 'b' para 2018-2020 y 'ab' para 2021, mientras que en 2022 se clasificó en el grupo 'a'. A pesar de

que la prueba SNK indica diferencias estadísticamente significativas, la variación en el nivel del mar es moderada. Por lo tanto, se concluye que ha habido un aumento gradual pero constante en el nivel del mar en los últimos tres años.

**Tabla 21**

*Clasificación de grupos de años con medias similares de nivel del mar*

<b>Año</b>	<b>Nivel del mar medio [m]</b>	<b>Grupo</b>
2018	2.2	b
2019	2.1	b
2020	2.2	b
2021	2.3	ab
2022	2.4	a

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Se utilizó la ecuación de tasa de variación porcentual ( $TV$ ) para evaluar los promedios anuales del nivel del mar. La fórmula aplicada es:

$$TV = \left( \frac{\bar{x}_t - \bar{x}_{t-1}}{\bar{x}_{t-1}} \right) \times 100 [\%]$$

donde  $\bar{x}_t$  es la media del nivel del mar en el año  $t$  y  $\bar{x}_{t-1}$  es la media del nivel del mar en el año anterior a  $t$ . La tabla 22 muestra las tasas de cambio año a año. La mayor tasa de variación anual se registró entre 2021 y 2022, con un aumento del 5.4%. La menor tasa de variación se observó entre 2018 y 2019, con una disminución del 1.2%. En promedio, la tasa de variación anual fue del 3.0%. La tabla indica que, durante el período de 2018 a 2022, ha habido fluctuaciones en el nivel del mar, pero con una tendencia general de incremento. La tasa de variación anual promedio del 3.0% sugiere un cambio gradual y constante en el nivel del mar durante estos años.

**Tabla 22**

*Tasa de variación anual para el nivel del mar*

<b>Años comparativos</b>	<b>Tasa de variación (%)</b>
2018 - 2019	-1.2
2019 - 2020	4.0
2020 - 2021	3.7
2021 - 2022	5.4

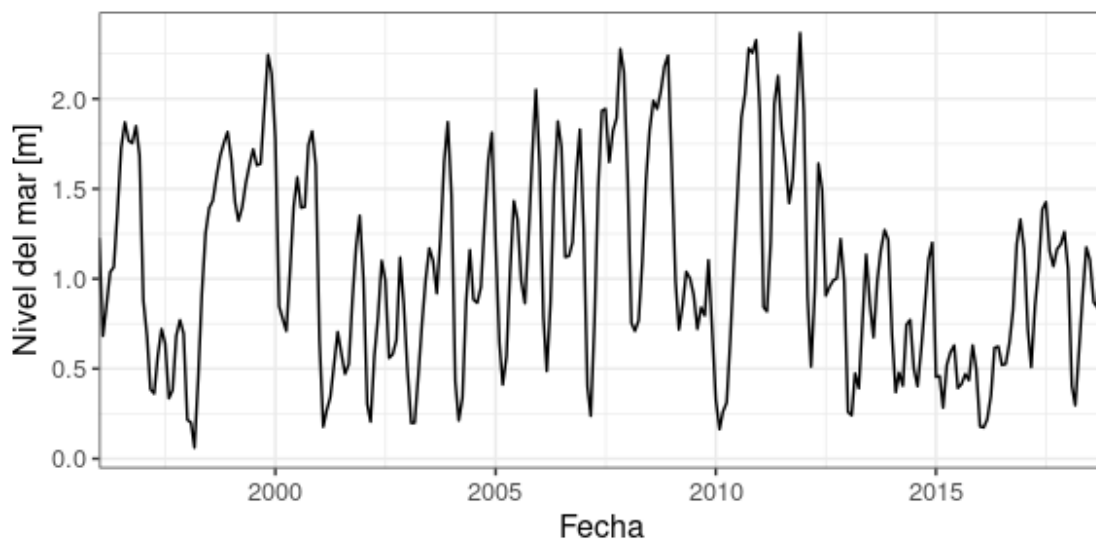
Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

#### 7.1.3.4. Análisis del nivel del río Magdalena.

La figura 36 muestra la serie de tiempo del nivel del río en metros 1996-01-01 hasta 2018-11-01. Durante este periodo, el nivel del río varía en un rango entre 0.1 y 2.4 m. Vemos un cambio en el rango de los valores en el rango de fechas entre 1996 hasta mediados del 2012, con respecto al periodo de años entre mediados del 2012 hasta finales del 2018. Lo cual sugiere que los máximos del nivel del río han disminuido en los últimos años.

**Figura 36**

*Serie de tiempo de nivel del río*



Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

La tabla 23 presenta los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilks para normalidad y de Dickey-Fuller para la estacionariedad aplicada a la serie de tiempo de nivel del mar. De acuerdo a los resultados, los datos poseen una distribución normal ( $p - \text{valor} > 0.05$ ) y que la serie es estacionaria ( $p - \text{valor} < 0.05$ ).

**Tabla 23**

*Pruebas de normalidad y estacionariedad para la serie de tiempo de nivel del mar*

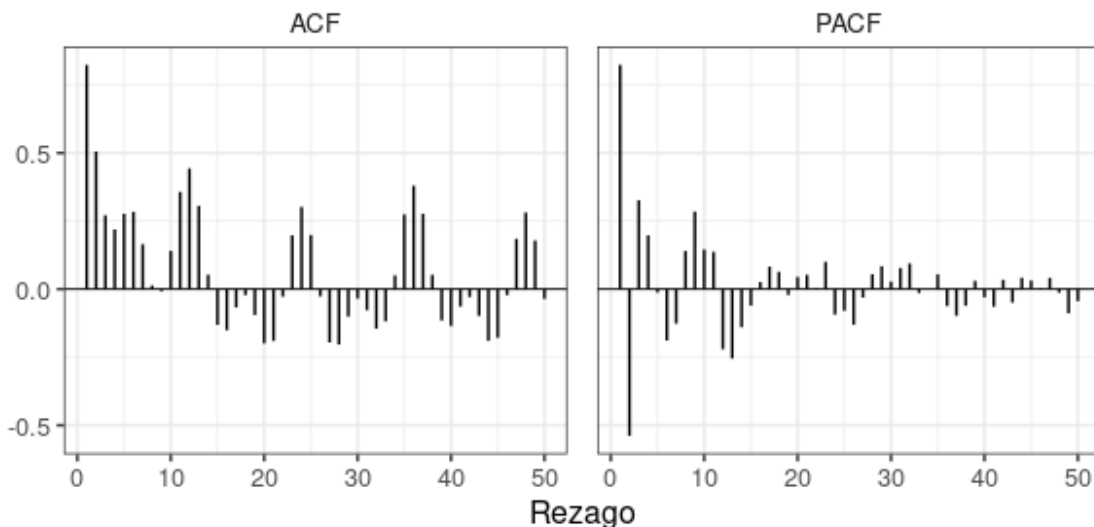
Prueba	p-valores
Normalidad (Shapiro-Wilks)	0.00
Estacionariedad (Dickey-Fuller)	0.01

*Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)*

La Figura 37 muestra las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) para la serie de tiempo del nivel del río, donde la ACF revela correlaciones significativas en los primeros rezagos que disminuyen progresivamente, sugiriendo una dependencia autorregresiva. Las correlaciones se muestran hasta el rezago 50, mientras que la PACF muestra picos significativos en rezagos específicos, indicando la influencia directa de ciertos valores pasados en el actual. Estos patrones apuntan a la posibilidad de que un modelo ARIMA sea adecuado para modelar la serie de tiempo, dada la evidencia de dependencias tanto a corto como a largo plazo en los datos.

**Figura 37**

*Autocorrelación y autocorrelación parcial para la serie de tiempo de nivel del mar*



*Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)*

Se ajustó un modelo ARIMA(3,0,1) a la serie, resultando en el Criterio de Información de Akaike (AIC) más bajo de  $\text{round}(\text{fit\_modelo}\$aic, 0)$ . El modelo se escribe de la siguiente manera:

$$(1 - 1.8403B + 1.800B^2 - 0.8330B^3)x_t = (1 - 0.7314B + 0.7511B^2)w_t$$

Aquí,  $x_t$  es la serie de tiempo,  $w_t$  es el término de ruido blanco y  $B$  es el operador de rezago. Se realizaron pruebas estadísticas para evaluar los residuos del modelo: la prueba de Ljung-Box para la independencia de los residuos muestra un  $p - \text{valor} < 0.05$ , lo que indica una falta de independencia en los residuos. Además, la prueba de Jarque-Bera para la normalidad de los residuos también arroja un  $p - \text{valor} < 0.05$ , sugiriendo que los residuos no siguen una distribución normal. Los resultados detallados de estas pruebas están presentados en la tabla 24.

**Tabla 24**

*Resultados de las pruebas de independencia y normalidad de los residuos del modelo ARIMA ajustado a la serie de tiempo de nivel del río*

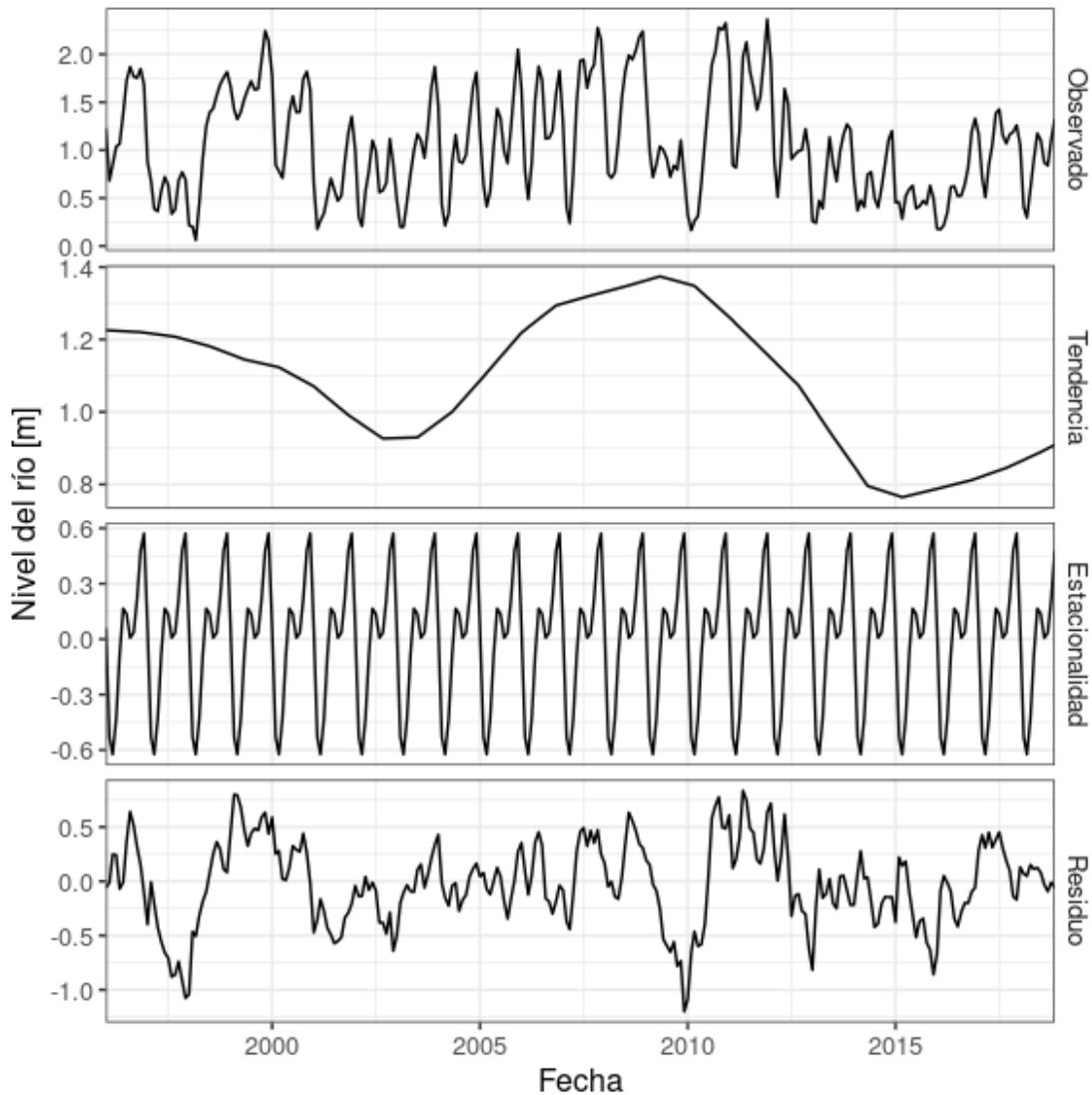
Prueba	p-valores
Independencia de residuos (Ljun-Box)	0
Normalidad de residuos (Jarque-Bera)	0

*Nota. Fuente:* Elaboración del autor (2023)

La figura 38 presenta un análisis STL detallado de la serie temporal del nivel del río. En el panel superior, los datos observados revelan una variabilidad marcada a lo largo del tiempo, ilustrando la dinámica fluctuante del río. El segundo panel muestra una tendencia clara y suave, alcanzando un pico en 2010 y luego descendiendo, lo que sugiere un periodo de altos niveles fluviales. El tercer panel destaca un patrón estacional cíclico, evidente cada año, con una amplitud constante, resaltando la previsibilidad periódica del nivel del río. Finalmente, el cuarto panel de residuos muestra las diferencias entre los datos observados y los componentes estimados de tendencia y estacionalidad, revelando comportamientos aleatorios y anomalías específicas, como descensos abruptos en los niveles en ciertos períodos, que no se explican completamente por los componentes analizados.

**Figura 38**

*Descomposición STL de la serie de tiempo de nivel del río*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Para determinar la relevancia estadística en los promedios anuales del nivel del río, se emplea el análisis de varianza (ANOVA). Este procedimiento estadístico se utiliza para evaluar si las diferencias entre las medias anuales del nivel del río son estadísticamente significativas. La hipótesis nula asume que no existe variación entre las medias anuales del nivel del río ( $H_0 : \mu_{año_1} = \dots = \mu_{año_n}$ ), mientras que la hipótesis alternativa sugiere que al menos un año presenta una media distinta ( $H_1 : \mu_{año_1} \neq \dots \neq \mu_{año_n}$ ). El valor de  $p$ -valor  $< 0.05$  indica

variaciones estadísticamente significativas en las medias del nivel del mar en al menos uno de los años estudiados, con una significancia del 5%. Esto conduce al rechazo de la hipótesis nula y a la conclusión de que hay al menos un promedio anual que difiere de los demás. Esta evidencia se respalda en la tabla 25 y las diferencias de los registros por año se detallan en la figura 39.

**Tabla 25**

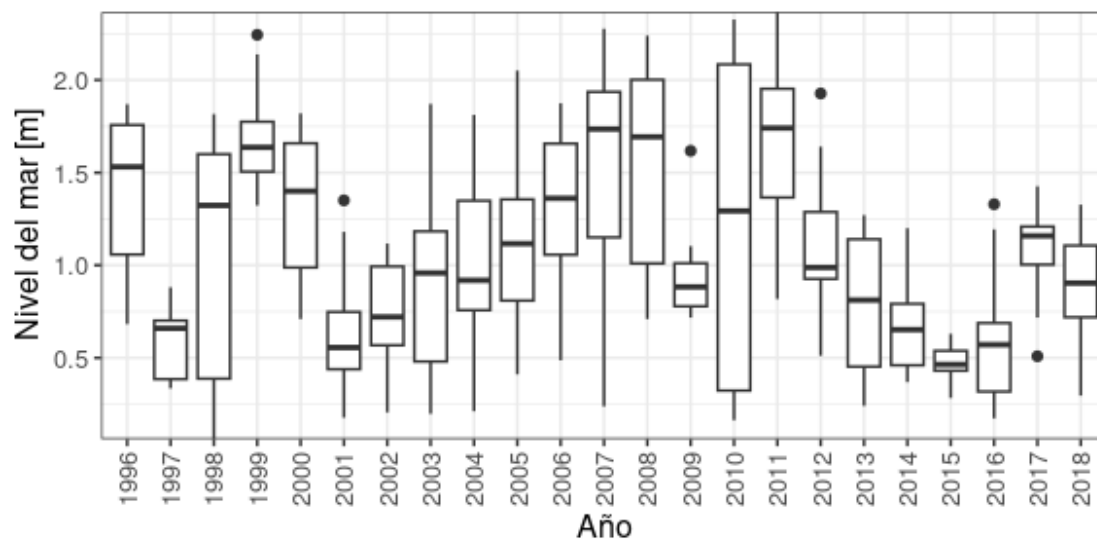
*Análisis de varianza de los registros de nivel del río por año*

Término	Grado de libertad	Suma cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Año	22	33.76	1.53	7.58	0.00
Residuos	252	51.03	0.20	-	-

Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

**Figura 39**

*Diagramas de cajas del nivel del mar por año.*



Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

La Tabla 14 muestra las observaciones del nivel medio del río para diferentes años, abarcando desde 1996 hasta 2018. A lo largo de este período, el nivel del río ha mostrado una variabilidad considerable, fluctuando entre 0.5 m y 1.7 m. Específicamente, en los años más recientes, desde 2016 hasta 2018, el nivel del río ha presentado cambios notables. En 2016, el nivel fue relativamente bajo, en torno a 0.6 m, incrementándose a 1.1 m en 2017 y luego disminuyendo a 0.9 m en 2018. Durante este período, los niveles del río se han clasificado en una variedad de grupos, con el año 1999 alcanzando el nivel más alto de 1.7 m y clasificándose en el grupo 'a'.

En contraste, el año 2015 registró el nivel más bajo, con 0.5 m, y se clasificó en el grupo 'h'. La prueba SNK indica diferencias estadísticamente significativas entre estos años, destacando la diversidad en los niveles del río. Por lo tanto, se concluye que, aunque hay variaciones anuales, no se observa una tendencia clara de aumento o disminución en el nivel del río durante los años analizados.

**Tabla 26**

*Grupos de años con medias similares*

<b>Año</b>	<b>Nivel del río medio (m)</b>	<b>Grupo</b>	<b>Año</b>	<b>Nivel del río medio (m)</b>	<b>Grupo</b>
1996	1.4	abcd	2008	1.6	abc
1997	0.6	gh	2009	0.9	defgh
1998	1.1	bcdefgh	2010	1.3	abcdef
1999	1.7	a	2011	1.6	ab
2000	1.3	abcde	2012	1.1	abcdefg
2001	0.6	gh	2013	0.8	efgh
2002	0.7	efgh	2014	0.7	fgh
2003	0.9	defgh	2015	0.5	h
2004	1.0	cdefgh	2016	0.6	gh
2005	1.1	abcdefg	2017	1.1	bcdefgh
2006	1.3	abcde	2018	0.9	defgh
2007	1.5	abcd			

*Fuente:* Elaboración del autor (2023)

Se utilizó la ecuación de tasa de variación porcentual ( $TV$ ) para evaluar los promedios anuales del nivel del mar. La fórmula aplicada es:

$$TV = \left( \frac{\bar{x}_t - \bar{x}_{t-1}}{\bar{x}_{t-1}} \right) \times 100 [\%]$$

donde  $\bar{x}_t$  es la media del nivel del mar en el año  $t$  y  $\bar{x}_{t-1}$  es la media del nivel del mar en el año anterior a  $t$ . La tabla 27 muestra las tasas de cambio año a año en el nivel del río. La mayor tasa de variación anual se observó entre 2016 y 2017, con un incremento significativo del 79.9%.

Por otro lado, la menor tasa de variación se registró entre 1996 y 1997, con una disminución del 57.9%. En promedio, las tasas de variación anual durante el período comprendido entre 1996 y 2018 indican fluctuaciones notables en el nivel del río. Estas variaciones oscilan entre aumentos y disminuciones significativas año tras año, reflejando una tendencia a cambios abruptos más que a un incremento o disminución constante. La diversidad de estas tasas de variación, que incluyen tanto incrementos pronunciados como disminuciones drásticas, sugiere una dinámica compleja en el nivel del río a lo largo de estos años, más que una tendencia general de aumento o disminución.

**Tabla 27**

*Tasa de variación anual para el nivel del mar*

<b>Años comparativos</b>	<b>Tasa de variación (%)</b>	<b>Años comparativos</b>	<b>Tasa de variación (%)</b>
1996 - 1997	-57.9	2007 - 2008	4.5
1997 - 1998	79.4	2008 - 2009	-39.3
1998 - 1999	59.2	2009 - 2010	33.4
1999 - 2000	-20.7	2010 - 2011	30.3
2000 - 2001	-52.4	2011 - 2012	-31.5
2001 - 2002	13.9	2012 - 2013	-30.0
2002 - 2003	26.4	2013 - 2014	-13.7
2003 - 2004	8.4	2014 - 2015	-29.0
2004 - 2005	12.5	2015 - 2016	24.6
2005 - 2006	17.2	2016 - 2017	79.9
2006 - 2007	13.2	2017 - 2018	-18.4

*Fuente:* Elaboración del autor (2023)

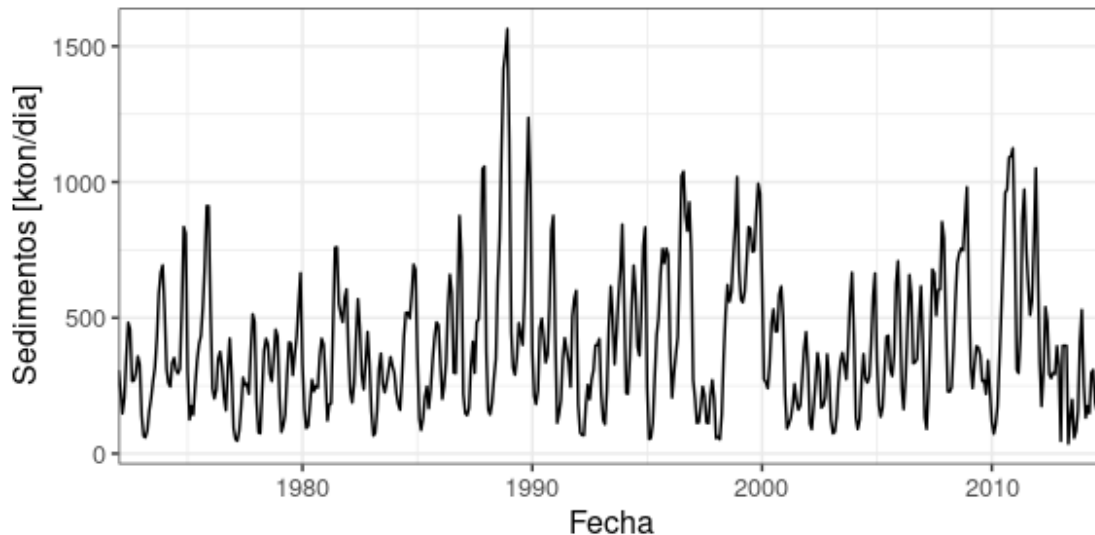
#### **7.1.3.5. Análisis de la sedimentación en el río Magdalena**

La figura 40 muestra la serie de tiempo de sedimentos en  $\text{kton dia}^{-1}$  desde 1972-01-01 hasta 2014-12-01. Durante este periodo, la cantidad de sedimentos varían en un rango entre 36.7 y 1563.7  $\text{kton dia}^{-1}$ . Hay fluctuaciones marcadas en la cantidad de sedimentos a lo largo del tiempo, con varios picos y valles. Esto sugiere una variabilidad considerable. No se observa una

tendencia clara y sostenida a lo largo de todo el período. Sin embargo, los picos son menos prominentes a finales del periodo de medición.

**Figura 40**

*Serie de tiempo de sedimentos*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La tabla 28 presenta los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilks para normalidad y de Dickey-Fuller para la estacionariedad aplicada a la serie de tiempo de sedimentos. De acuerdo a los resultados, los datos poseen una distribución normal ( $p - \text{valor} > 0.05$ ) y que la serie es estacionaria ( $p - \text{valor} < 0.05$ ).

**Tabla 28**

*Pruebas de normalidad y estacionariedad para la serie de tiempo de sedimentos*

<b>Prueba</b>	<b>p-valores</b>
Normalidad (Shapiro-Wilks)	0.00
Estacionariedad (Dickey-Fuller)	0.01

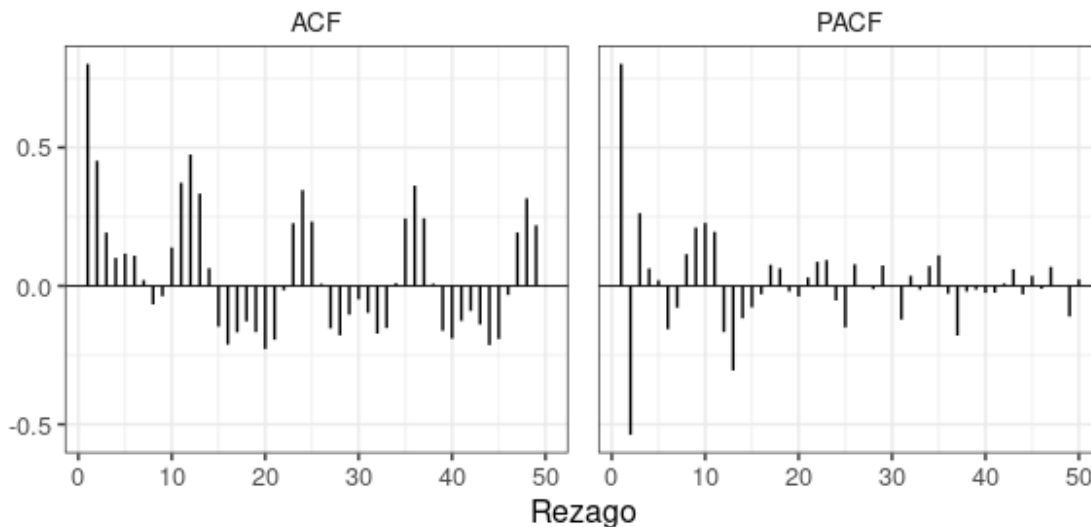
*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La figura 41 muestra las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) para la serie de sedimentos. La ACF indica correlaciones significativas en los primeros rezagos que disminuyen con el tiempo, lo que puede sugerir un componente autorregresivo en los datos. Por otro lado, la PACF presenta picos notables en ciertos rezagos, lo que puede indicar la influencia directa de observaciones anteriores específicas. Estos patrones sugieren que un

modelo ARIMA podría ser apropiado para modelar esta serie de tiempo, ya que hay evidencias de dependencias a corto y largo plazo. Las correlaciones se extienden hasta el rezago número 50.

**Figura 41**

*Autocorrelación y autocorrelación parcial para la serie de tiempo de sedimentos*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Se ajusta un modelo ARIMA (3,0,0) a la serie, resultando en el Criterio de Información de Akaike (AIC) más bajo de 6445. El modelo se escribe de la siguiente manera:

$$(1 - 1.3731B + 0.8596B^2 - 0.2616B^3)x_t = w_t$$

Aquí,  $x_t$  es la serie de tiempo,  $w_t$  es el término de ruido blanco y  $B$  es el operador de rezago. Se realizaron pruebas estadísticas para evaluar los residuos del modelo: la prueba de Ljung-Box para la independencia de los residuos muestra un  $p - \text{valor} > 0.05$ , lo que indica la independencia en los residuos. Además, la prueba de Jarque-Bera para la normalidad de los residuos también arroja un  $p - \text{valor} < 0.05$ , sugiriendo que los residuos no siguen una distribución normal. Los resultados detallados de estas pruebas están presentados en la tabla 29.

**Tabla 29**

*Resultados de las pruebas de independencia y normalidad de los residuos del modelo ARIMA ajustado a la serie de tiempo de sedimentos*

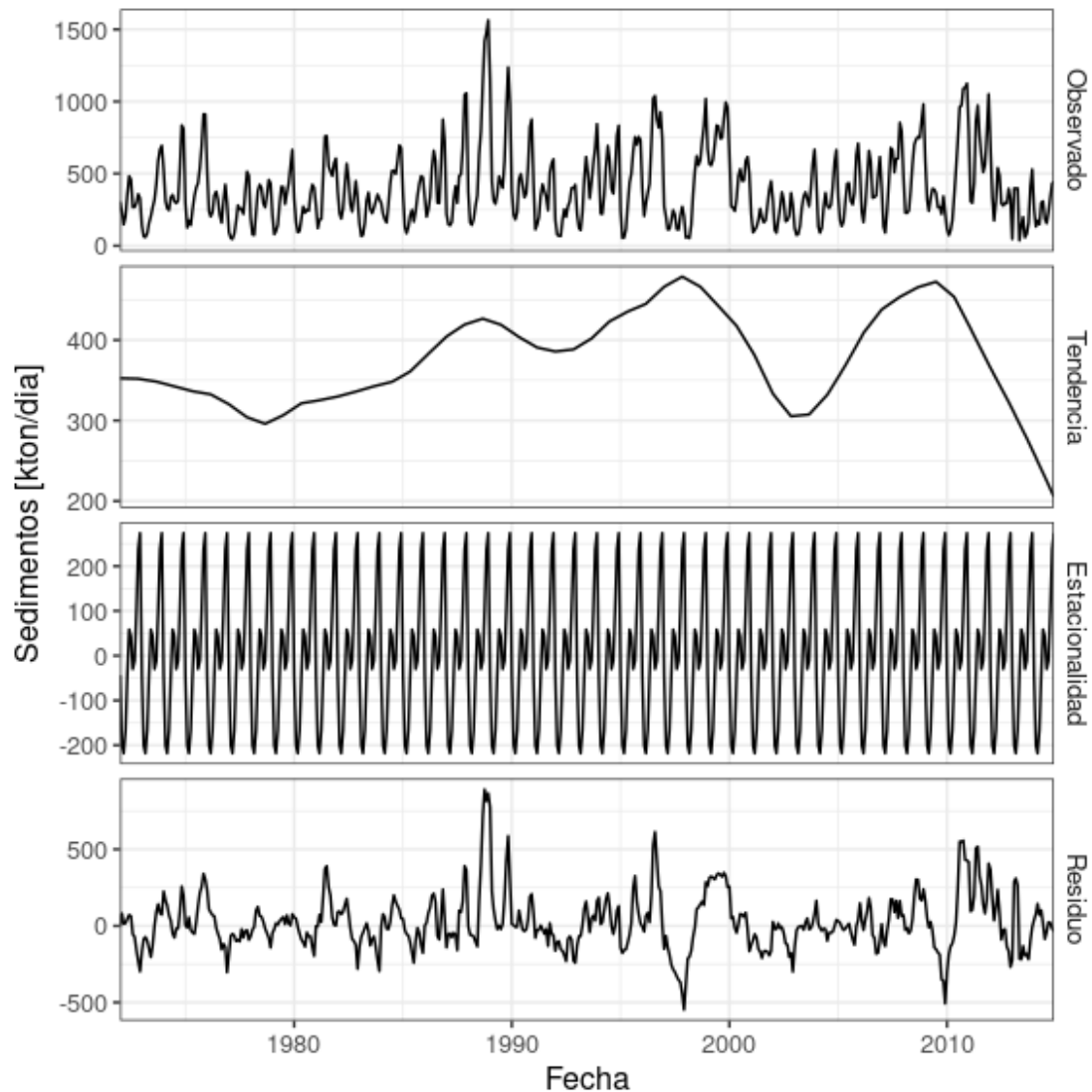
<b>Prueba</b>	<b>p-valores</b>
Independencia de residuos (Ljun-Box)	0.75
Normalidad de residuos (Jarque-Bera)	0.00

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La figura 42 presenta un análisis STL de la serie de sedimentos en  $\text{kton día}^{-1}$ . El panel superior muestra los datos observados, que exhiben una variabilidad considerable en el tiempo, reflejando dinámicas complejas de los sedimentos. El segundo panel se muestra la tendencia donde al inicio de la serie se observa una tendencia creciente con un comportamiento cuasioscilar, luego, en el año 2010 se presenta un descenso en la cantidad de sedimentos. El tercer panel ilustra un patrón estacional claro y repetitivo, que ocurre anualmente con una amplitud constante, lo que subraya la periodicidad en los niveles de sedimentos. El cuarto panel de residuos muestra las fluctuaciones que no se atribuyen ni a la tendencia ni a la estacionalidad, revelando comportamientos irregulares y anomalías.

**Figura 42**

*Descomposición STL de la serie de tiempo de sedimentos*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Para determinar la significancia en los promedios anuales de los sedimentos, se empleó un ANOVA. Este procedimiento evalúa las diferencias entre las medias anuales de las mediciones. La hipótesis nula asume que no existe variación entre las medias anuales ( $H_0 : \mu_{año_1} = \dots = \mu_{año_n}$ ), mientras que la hipótesis alternativa sugiere que al menos un año presenta una media distinta ( $H_1 : \mu_{año_1} \neq \dots \neq \mu_{año_n}$ ). El valor de  $p$  - valor  $< 0.05$  indica diferencias significativas en los promedios de sedimentos en al menos uno de los años

estudiados. Esto conduce al rechazo de la hipótesis nula y a la conclusión de que hay al menos un promedio anual que difiere de los demás. Esta evidencia se respalda en la tabla 30 y las diferencias de los registros por año se detallan en la figura 43.

**Tabla 30**

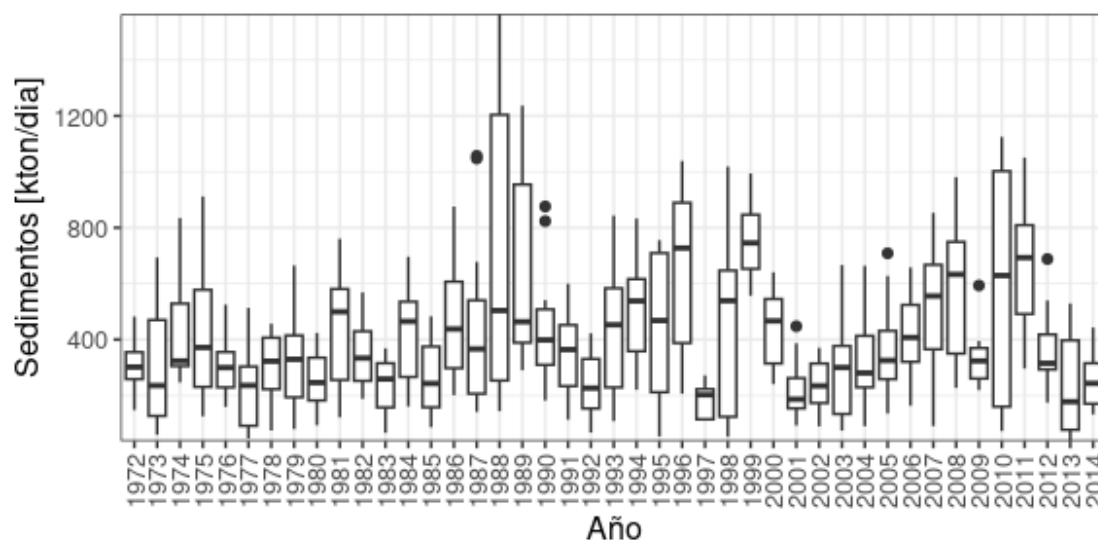
*Análisis de varianza de los registros de sedimentación por año*

<b>Término</b>	<b>Grado de libertad</b>	<b>Suma cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>Año</b>	42	10,455,178.72	248,932.83	5.16	0.00
<b>Residuos</b>	473	22,833,474.20	48,273.73	-	-

Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

**Figura 43**

*Diagramas de cajas de la cantidad sedimentos por año.*



Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

La tabla 31 muestra las observaciones de sedimentos en kilotoneladas por día para diferentes años, desde 1972 hasta 2014. Durante este período, los sedimentos han mostrado una variabilidad significativa, fluctuando entre 187.1 kton/día y 757.2 kton/día. En particular, en los años más recientes de la serie, de 2011 a 2014, los niveles de sedimentos han experimentado variaciones notables: 663.2 kton/día en 2011, disminuyendo a 367.8 kton/día en 2012, luego a 237.0 kton/día en 2013, y una ligera subida a 258.5 kton/día en 2014. A lo largo de los años, los niveles de sedimentos se han clasificado en una gama de grupos, siendo 1999 el año con el nivel

más alto, 757.2 kton/día, clasificándose en el grupo 'a'. En contraposición, 1997 registró el nivel más bajo, con 187.1 kton/día, situándose en el grupo 'h'. Las diferencias entre grupos indicadas por la prueba SNK son estadísticamente significativas, resaltando la diversidad en los niveles de sedimentos. Por tanto, aunque existen variaciones anuales, no se aprecia una tendencia clara de aumento o disminución en los niveles de sedimentos a lo largo de los años estudiados.

**Tabla 31**

*Grupos de años con medias similares*

<b>Año</b>	<b>Sedimentos (kton/día)</b>	<b>Grupo</b>	<b>Año</b>	<b>Sedimentos (kton/día)</b>	<b>Grupo</b>
1972	308.6	efgh	1994	504.7	abcdefgh
1973	306.5	efgh	1995	440.5	bcdefgh
1974	427.2	bcdefgh	1996	652.2	abcd
1975	435.4	bcdefgh	1997	187.1	h
1976	303.4	efgh	1998	462.0	bcdefgh
1977	235.7	gh	1999	757.2	a
1978	298.3	fgh	2000	446.9	bcdefgh
1979	328.9	defgh	2001	219.4	h
1980	254.2	gh	2002	236.2	gh
1981	456.7	bcdefgh	2003	301.4	efgh
1982	345.1	cdefgh	2004	324.2	defgh
1983	238.7	gh	2005	357.7	cdefgh
1984	422.3	bcdefgh	2006	418.6	bcdefgh
1985	274.4	fgh	2007	501.7	abcdefgh
1986	471.2	bcdefgh	2008	577.1	abcdefg
1987	455.6	bcdefgh	2009	329.9	defgh
1988	709.2	ab	2010	609.4	abcdef
1989	636.3	abcde	2011	663.2	abc
1990	443.4	bcdefgh	2012	367.8	cdefgh
1991	358.6	cdefgh	2013	237.0	gh

Año	Sedimentos (kton/día)	Grupo	Año	Sedimentos (kton/día)	Grupo
1992	235.4	gh	2014	258.5	gh
1993	427.8	bcdefgh			

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

Se utilizó la ecuación de tasa de variación porcentual ( $TV$ ) para evaluar los promedios anuales del nivel del mar. La fórmula aplicada es:

$$TV = \left( \frac{\bar{x}_t - \bar{x}_{t-1}}{\bar{x}_{t-1}} \right) \times 100 [\%]$$

donde  $\bar{x}_t$  es la media del nivel del mar en el año  $t$  y  $\bar{x}_{t-1}$  es la media del nivel del mar en el año anterior a  $t$ . La tabla 32 muestra las tasas de variación porcentuales año a año en los niveles de sedimentos del río. La mayor tasa de variación anual se registró entre 1997 y 1998, con un aumento del 146.9%, mientras que la disminución más significativa ocurrió entre 1996 y 1997, con una caída del 71.3%. En promedio, las tasas de cambio anual durante el período de 1972 a 2014 muestran fluctuaciones notables en los niveles de sedimentos. Estas variaciones comprenden tanto incrementos pronunciados como disminuciones drásticas, lo que indica una tendencia a cambios bruscos más que a un incremento o disminución constante. La diversidad en estas tasas, incluyendo los aumentos más grandes y las caídas más significativas, sugiere una dinámica compleja en los niveles de sedimentos del río a lo largo de los años.

**Tabla 32**

*Tasa de variación anual para la cantidad de sedimentos*

Años comparativos	Tasa de variación (%)	Años comparativos	Tasa de variación (%)
1972 - 1973	-0.7	1993 - 1994	18.0
1973 - 1974	39.4	1994 - 1995	-12.7
1974 - 1975	1.9	1995 - 1996	48.1
1975 - 1976	-30.3	1996 - 1997	-71.3
1976 - 1977	-22.3	1997 - 1998	146.9
1977 - 1978	26.5	1998 - 1999	63.9

<b>Años comparativos</b>	<b>Tasa de variación (%)</b>	<b>Años comparativos</b>	<b>Tasa de variación (%)</b>
1978 - 1979	10.2	1999 - 2000	-41.0
1979 - 1980	-22.7	2000 - 2001	-50.9
1980 - 1981	79.6	2001 - 2002	7.7
1981 - 1982	-24.4	2002 - 2003	27.6
1982 - 1983	-30.8	2003 - 2004	7.6
1983 - 1984	76.9	2004 - 2005	10.3
1984 - 1985	-35.0	2005 - 2006	17.0
1985 - 1986	71.7	2006 - 2007	19.8
1986 - 1987	-3.3	2007 - 2008	15.0
1987 - 1988	55.7	2008 - 2009	-42.8
1988 - 1989	-10.3	2009 - 2010	84.8
1989 - 1990	-30.3	2010 - 2011	8.8
1990 - 1991	-19.1	2011 - 2012	-44.5
1991 - 1992	-34.3	2012 - 2013	-35.6
1992 - 1993	81.7	2013 - 2014	9.1

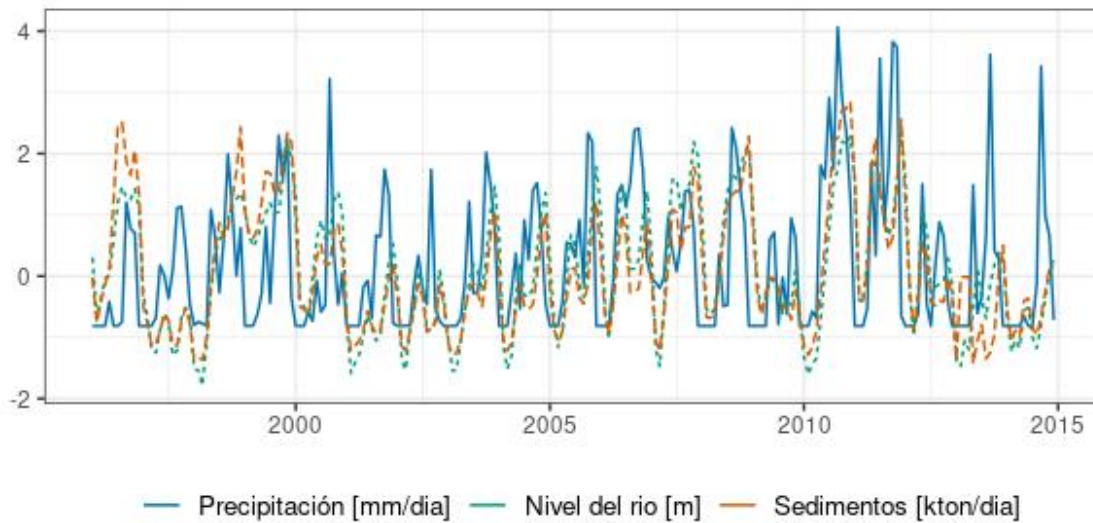
*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

#### **7.1.3.5. Análisis de correlación entre precipitación, nivel del río y sedimentación.**

Esta sección se analizó la correlación entre las variables de precipitación, nivel del río y sedimentos, centrándose en el intervalo de 1996 a 2014. En este periodo, se cuenta con datos simultáneos para dichas variables. La figura 44 muestra la serie de precipitación representada por una línea sólida azul, el nivel del río por una línea discontinua verde, y la serie de sedimentos mediante una línea punteada naranja. Estas series temporales se presentan en términos de desviaciones estándar, es decir, se han normalizado sustrayendo el promedio y dividiendo por la desviación estándar correspondiente. Este enfoque facilita la comparación de tendencias y componentes estacionales entre las variables. Un análisis inicial indica una correlación significativa entre la serie de precipitación y las de nivel del río y sedimentos, sugiriendo la posibilidad de patrones cíclicos anuales.

**Figura 44**

*Series de tiempo de las variables de precipitación, nivel del río y sedimentos.*

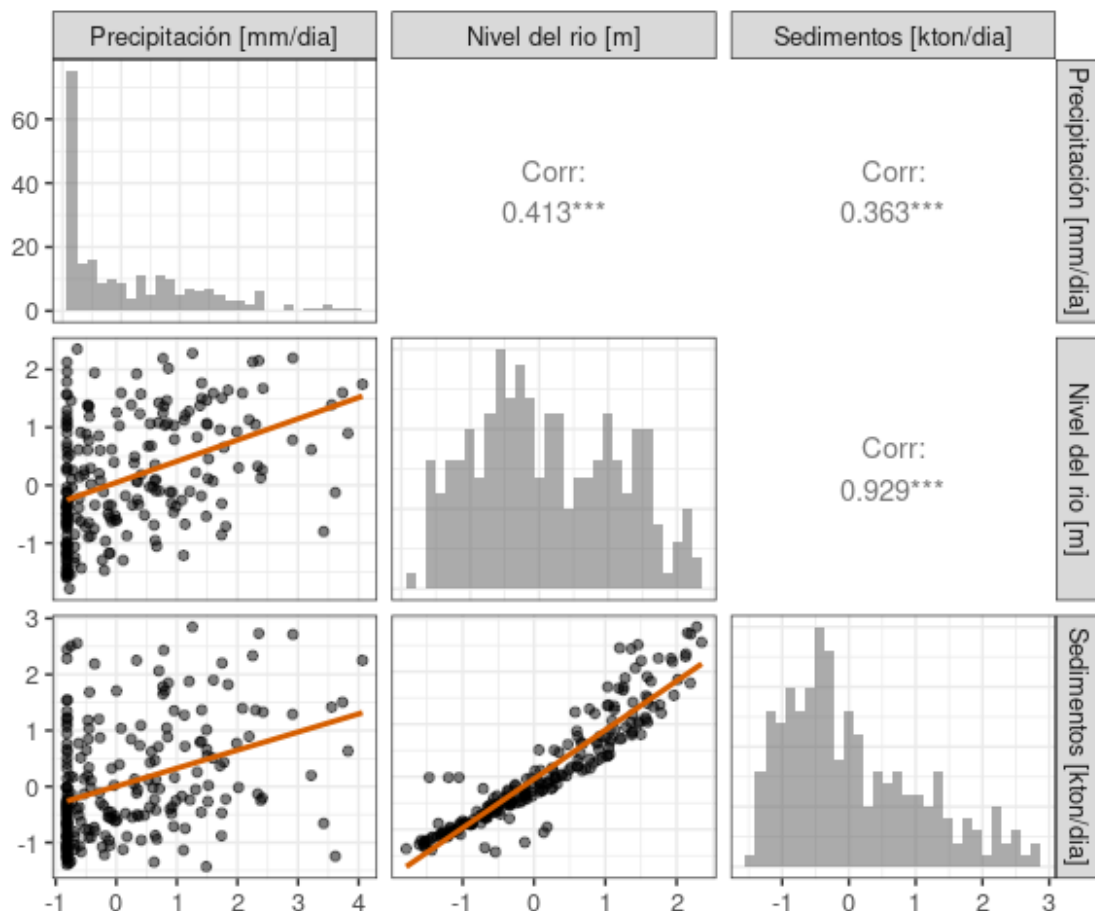


*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

La figura 45 muestra una matriz de gráficos correspondientes a un análisis de series de tiempo de tres variables: Precipitación (mm/día), Nivel del Río (m) y Sedimentos (kton/día). Cada fila y columna representa una variable, donde la diagonal principal exhibe histogramas que describen la distribución de cada una. Los gráficos situados fuera de la diagonal son diagramas de dispersión, los cuales comparan dos variables. Estos incluyen líneas de tendencia en rojo, evidenciando la relación entre ellas; la pendiente de estas líneas indica visualmente el grado de correlación entre las variables, siendo más pronunciada a medida que la correlación es mayor. En la parte superior de la matriz se presentan los valores de la correlación de Pearson para cada par de variables. Tres asteriscos indican una correlación estadísticamente significativa ( $p - \text{valor} < 0.05$ ) entre las variables comparadas.

**Figura 45**

*Diagramas de dispersión para las variables de precipitación, nivel del río y sedimentos.*



*Nota.* Fuente: Elaboración del autor (2023)

El histograma situado en la intersección de la primera fila y columna ilustra la frecuencia de los valores de precipitación diaria, destacando que la mayoría de los días presentan niveles bajos de precipitación. En la segunda fila y columna, el nivel del río muestra una distribución bimodal, sugiriendo posiblemente distintos estados fluviales, como períodos secos y húmedos. La marcada correlación de 0.929 entre el nivel del río y los sedimentos, observada en la intersección de estas dos variables, implica que a niveles más altos del río corresponden mayores cantidades de sedimentos transportados. Esto concuerda con la comprensión de que el transporte de sedimentos se intensifica con aumentos en los caudales del río. Las correlaciones significativas

observadas entre las tres variables sugieren relaciones directas, indicando potencialmente que la lluvia influye en el nivel del río, el cual, a su vez, afecta la cantidad de sedimentos transportados.

Esto sugiere que en un contexto de cambio climático donde los patrones de precipitación pueden variar, es posible que se produzcan cambios en el nivel del río y en el transporte de sedimentos. Por lo tanto, es importante comprender la dinámica entre estas variables para poder predecir los efectos del cambio climático en el transporte de sedimentos.

El análisis ha abordado variables climáticas como la temperatura, la precipitación, el nivel del río/mar y los sedimentos. Se ha identificado un incremento progresivo en la temperatura a lo largo de los años, alineándose con las tendencias globales del cambio climático. Aunque se observa un descenso en los últimos años, la tendencia general apunta hacia un aumento gradual. En cuanto a la precipitación, se han detectado variaciones significativas en su patrón anual, reflejando la dinámica cambiante de los patrones climáticos. Estas variaciones son corroboradas por la clasificación de años a través de la prueba de Student-Newman-Keuls (SNK).

Paralelamente, se ha observado un aumento gradual y constante en el nivel del mar desde 2018 hasta 2022. Este hallazgo es especialmente relevante, dada la relación del nivel del mar con una variedad de factores ambientales y climáticos. Además, se han encontrado correlaciones significativas entre la precipitación, el nivel del río y los sedimentos. Estas correlaciones apuntan a una compleja interacción entre estos elementos, sugiriendo que variaciones en uno de estos factores pueden influir considerablemente en los demás, lo cual se confirma con la significancia de los coeficientes de correlación de Pearson.

Específicamente, se ha demostrado que los cambios en los patrones de precipitación pueden tener un impacto directo en el nivel del río y, por ende, en el transporte de sedimentos. Esta relación es crucial para entender la dinámica fluvial y su respuesta a las variaciones climáticas. Además, el análisis ha revelado que aunque existen fluctuaciones anuales significativas en los

niveles de sedimentos, no se observa una tendencia clara de aumento o disminución a lo largo de los años.

Cuando llueve se generan dos fenómenos importantes aumento de nivel del río y aumento en la sedimentación. En el canal de acceso existen dos puntos especiales donde más se sedimenta el río, uno es Bocas de Ceniza afectando todos los terminales y en el km 14.

Cuando el nivel del río sube, aguas arriba prolifera en zonas tranquilas del río las aguas quietas las tarulla o buchón de agua (*Eichhornia crassipes.*) y se desplazan río abajo creando bancos muy grandes alrededor de los buques atracados en el puerto, afectando sus cajas de mar que están diseñadas para la refrigeración del barco a partir del agua del río y las bloquean y en ocasiones los barcos se deben remolcar para realizar las reparaciones respectivas.

Finalmente, los resultados de este estudio enfatizan la importancia de una vigilancia continua y un análisis detallado de las variables climáticas. Estos son esenciales para predecir y mitigar los efectos del cambio climático en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Además, subrayan la necesidad de estrategias de gestión ambiental para disminuir la vulnerabilidad de las estructuras y comunidades a los efectos del cambio climático.

La climatología en el área de puerto de Barranquilla está clasificada como subhúmedo seco y semiárido, caracterizada por una temperatura media de 27.7 °C (27.7-30.4 °C), con una precipitación anual acumulada de 7.50 mm, una temporada baja en lluvias inducida por el Anticiclón de Azores que provoca mayor intensidad de vientos y reducción de nubosidad. La época de lluvias típicamente se produce entre mayo y noviembre favorecida por el ascenso de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y el sistema de baja presión, los cuales inducen fuertes lluvias y tormentas eléctricas. Frente al litoral Caribe Colombiano se observa en algunas ocasiones de manera inesperada vientos fuertes a causa de las diferencias de presión atmosférica entre el sistema de alta presión de Azores ubicado en el centro del océano Atlántico y el sistema de baja presión del Darién ubicado sobre el centro-sur del litoral Caribe Colombiano, favoreciendo el flujo constante de los vientos Alisios. En resumen, se pueden desarrollar

velocidades desde 8 hasta 32 nudos, sobre esta zona tienen influencia las ondas tropicales del Este, la ZCIT, ciclones tropicales, los vientos Alisios y el Anticiclón de Azores. (CIOH Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, 2020).

Cuando se presentan estas velocidades puede poner en peligro la maniobrabilidad de las naves al igual que el cargue y descargue de la mercancía como graneles generen poca visibilidad y/o material particulado, contaminando el aire.

Para la zona del mar caribe, en general, los pronósticos para el fin del siglo XXI estiman un aumento medio en la temperatura de 2,5°C (rango 1,5°C a 5,0°C), una disminución del 10% en las precipitaciones medias anuales (rango -25% a +10%), especialmente en el verano. Un efecto que se produce en Bocas de Ceniza y afecta a todo el Puerto de Barranquilla que se da por las altas temperaturas en temporada de verano y repercute en el bajo nivel del río, es la cuña marina; la cual consiste en la intrusión de agua salina dentro del río.

#### **7.1.4. Escenarios de Cambio Climático**

El cambio climático modifica directamente las variables de precipitación y temperatura en el tiempo. Para efectos del Departamento del Atlántico, se tomaron en cuenta las dos proyecciones climáticas sobre los cambios de precipitación y temperatura para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

**Tabla 33**

*Proyección del cambio de la temperatura entre los años 2011 y 2100*

<b>Años</b>	<b>Periodo 1</b>	<b>Periodo 2</b>	<b>Periodo 3</b>
<b>Localización</b>	<b>2011-2040</b>	<b>2041-2070</b>	<b>2071-2100</b>
<b>Departamento del Atlántico</b>	Entre 1 y 2 °C	Entre 2 y 3 °C	Entre 3 y 4 °C

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor según información del IDEAM, Tercera Comunicación Nacional (2017)

Inundación por aumento de precipitación: teniendo en cuenta que el país no cuenta con proyecciones de inundaciones por aumento de precipitación, se tomará como referencia la

información del mapa de inundación agregado en el cual se muestran las zonas de inundación habituales y las zonas de inundación ocasionadas por el fenómeno de La Niña 2010-2011. De acuerdo con el IPCC, los cambios de temperatura afectan este tipo de fenómenos generando aumentos en su frecuencia y magnitud (MinTransporte, 2014).

**Tabla 34**

*Proyección del cambio de precipitación entre los años 2011 y 2100*

Años	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Localización			
Departamento del Atlántico	-11,3 mm	-13,38 mm	-16,2 mm

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor según información del IDEAM, Tercera Comunicación Nacional (2017)

A pesar de notarse una disminución en las precipitaciones para los próximos años, se debe tener en cuenta los datos de alteraciones de precipitación y temperatura por los fenómenos de La Niña y El Niño.

La inundación por ascenso del nivel del mar: las áreas de riesgo por inundación hacen referencia a aquellas áreas que son anegadas por una precipitación pluvial moderada e incluyen, encharcamiento por deficiencias de drenaje superficial, desbordamiento de corrientes naturales. Adicionalmente, el aumento del nivel del mar crea nuevas áreas de riesgo para la infraestructura portuaria. Resulta en una acelerada erosión costera, la salinización de los suelos, y define progresivamente una nueva línea de costa y nuevos sectores susceptibles a remoción en masa. El INVEMAR ha generado proyecciones de inundación de las costas Atlántica y Pacífica por ascenso del nivel del mar a 0,30 m para el 2030 y 1 m para el 2100 (MinTransporte, 2014).

**Tabla 35**

*Proyección del cambio en el nivel del mar entre los años 2011 y 2100*

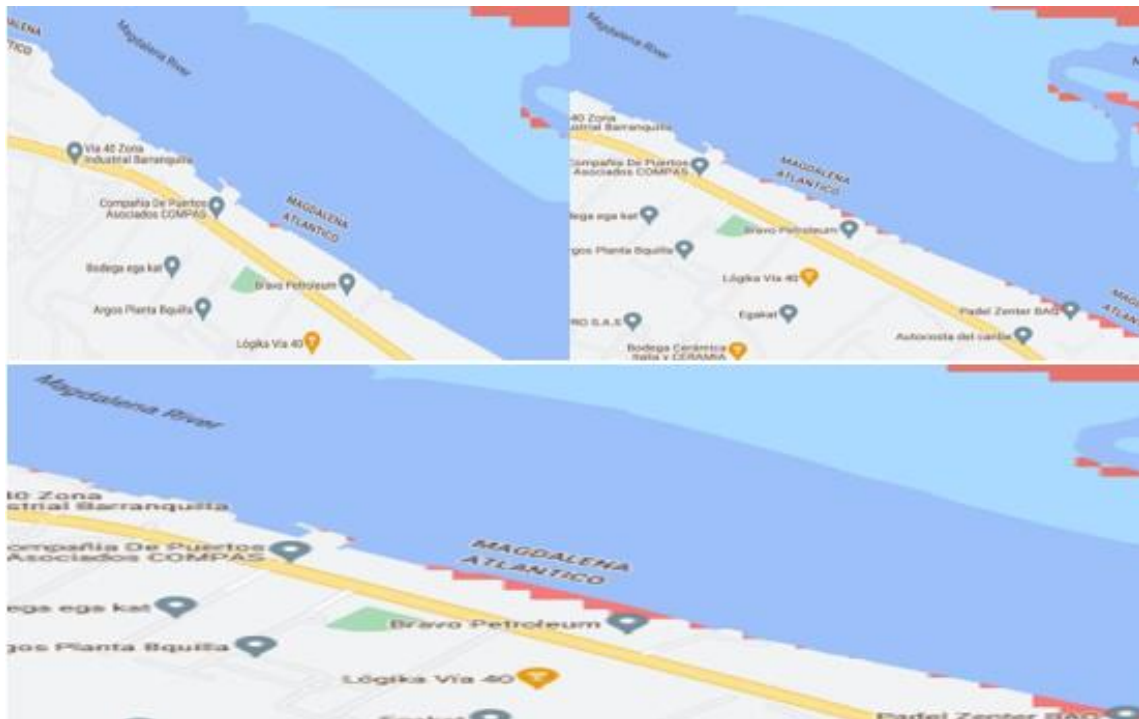
Años Localización	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Departamento del Atlántico	0,30 m	0,75 m	1 m

*Nota.* Fuente: Elaboración del autor según información del IDEAM, Tercera Comunicación Nacional (2017)

En la figura 46, las zonas rojas representan los niveles de inundación de la costa, en simulaciones realizadas en la página <https://coastal.climatecentral.org/> del Climate Central, se establecieron escenarios para los años 2030, 2070 y 2100 con RCP de 4.5, el cual presentó un aumento del nivel del mar de 0.25, 0.37 y 0.48 respectivamente.

**Figura 46**

*Escenarios en el puerto de Barranquilla para los años 2030, 2070 y 2100 con RCP de 4.5*



*Nota.* Fuente: Climate Central (2023)

#### **7.1.4.1. Línea de costa y erosión**

La erosión costera puede atribuirse a la pérdida de sedimentos, la cual resulta de diversos factores naturales como olas, corrientes, huracanes y tsunamis, así como factores antropogénicos como la extracción de arenas y recursos marino-costeros para la construcción, la tala de manglares y la implementación descoordinada de obras costeras e infraestructuras cercanas a la línea de costa. En las últimas décadas, la contribución de sedimentos de los ríos al sistema costero ha disminuido debido a la construcción de infraestructuras como tajamares y embalses hidroeléctricos (Mogollón, 2015). Además, la construcción no coordinada de estructuras rígidas para la protección costera, cambios en los usos del suelo, la destrucción de los ecosistemas de manglares y la explotación excesiva de arena han exacerbado la erosión. La elevación relativa del nivel del mar debido al cambio climático y a movimientos tectónicos también ha agravado la erosión. Sin medidas de mitigación adecuadas, la pérdida de terreno continuará en el futuro. En los años venideros, la erosión constante podría representar una amenaza para las comunidades asentadas en la zona, así como para la infraestructura y el hábitat natural a lo largo de la costa, que actualmente se encuentran a una distancia segura del agua. (MinAmbiente, 2014)

La erosión costera en la zona comprendida entre Ciénaga y el Parque Isla de Salamanca, a lo largo del río Magdalena, posee puntos más críticos como el kilómetro 19 de la carretera de Barranquilla a Ciénaga.

#### **7.1.4.2. Huella Ambiental portuaria**

La huella ambiental o de carbono es un indicador ambiental creado para medir la cantidad de dióxido de carbono que genera un individuo, una organización, un proceso, una mercancía o un evento, para poder realizar una actividad y se calcula a través de la cantidad de gases de efecto invernadero – GEI expresados en toneladas de CO<sub>2</sub>eq que se emite a la atmósfera.

La siguiente información es parte del reporte del 2022 de la compañía:

**Tabla 36***GEI y Huella de Carbono, puerto COMPAS Barranquilla*

<b>Año</b>	<b>Alcance 1</b> Toneladas de CO2 equivalente	<b>Alcance 2</b> Toneladas de CO2 equivalente	<b>Alcance 3</b> Toneladas de CO2 equivalente	<b>Total</b> Toneladas de CO2 equivalente
2019	135,1	258,8	-	393,9
2020	170,9	286,4	-	457,2
2021	181,5	211,9	-	393,3
2022	258,36	238,8	55,51	552,67

*Nota:* Alcance 1-consumo Combustibles fósiles para movilizar la flota, gases refrigerantes y aguas residuales; Alcance 2 – Consumo de energía eléctrica; Alcance 3 – Consumo de papel, uso de celulares y vuelos nacionales realizados. Fuente: Elaboración del autor según COMPAS (2022) y WPCI (2010)

#### **7.1.4.3. Emisiones al aire**

La Compañía se acoge a la Resolución 2254 de 2017 del ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, donde se determinan los niveles máximos permisibles de contaminantes:

La tabla 37 presenta parte del reporte del 2022 de la compañía y el cálculo de sus emisiones al aire por la actividad dado en microgramos por metro cúbico.

**Tabla 37***Emisiones de aire puerto COMPAS Barranquilla año 2022*

<b>Tipo de emisión</b>	<b>Punto 1</b> µg/m <sup>3</sup>	<b>Punto 2</b> µg/m <sup>3</sup>	<b>Punto 3</b> µg/m <sup>3</sup>	<b>Punto 4</b> µg/m <sup>3</sup>
<b>Partículas (PM10)</b>	38,72	39,65	41,76	39,26
<b>Partículas (PM2.5)</b>	13,48	11,79	14,32	13,53
<b>SO2</b>	14,74	17,55	20,99	12,02
<b>NO2</b>	35,17	35,73	35,30	35,9
<b>O3</b>	35,7	34,33	33,78	32,41
<b>CO</b>	1.347,65	1.348,11	1.360,5	1.367,48

*Nota:* material particulado (PM10 y PM2.5), dióxido de azufre (SO2), dióxido de nitrógeno (NO2), ozono troposférico (O3) y monóxido de carbono (CO). Fuente: Tomado y adaptado de COMPAS (2022)

### **7.1.5. Análisis de vulnerabilidad al cambio climático en el puerto COMPAS de Barranquilla**

#### **7.1.5.1. Cálculo del índice de riesgo climático empresarial - IRCE**

El análisis de riesgos climáticos empresariales abordó tres componentes: 1. probabilidad de ocurrencia, 2. consecuencias esperadas y 3. capacidad adaptativa (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

La valoración cuantitativa y cualitativa de la gravedad y sus consecuencias se calificaron en una escala de 2 a 10, involucrando el nivel económico, ambiental y social evaluado desde los registros de los acontecimientos registrados en el sistema.

Posteriormente se calculó el IRCE que se deriva de la probabilidad de ocurrencia (PO) y de las consecuencias esperadas (CE), según la ecuación:

$$IRCE = PO * CE$$

La tabla 38 muestra la probabilidad de ocurrencia de los impactos identificados

**Tabla 38**

*Probabilidad de ocurrencia efectos climáticos y su impacto en puerto COMPAS Barranquilla*

<b>AMENAZA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>Probabilidad de ocurrencia</b>
Variación nivel del río	De acuerdo con la Organización de los Estados Americanos - Manual para el Diseño e Implementación de un Sistema de Unidad de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, la medición de las precipitaciones y la profundidad de los ríos tiene como propósito realizar un seguimiento a las condiciones hidrológicas que puede producir una inundación. Está proyectado aumento en los niveles de río gradualmente para los períodos entre el año 2040 y 2100.	Probable

AMENAZA	DESCRIPCIÓN	Probabilidad de ocurrencia
Sedimentación por Erosión/socavación de márgenes del puerto	De acuerdo con la publicación de Vargas (2012), la dinámica Costera, en la zona de Barranquilla, "como producto de la alta sedimentación producida por el delta del río Magdalena en conjunto con las corrientes costeras hacia el suroeste, está produciendo una migración de las barras de arenas marinas y costeras con la notable disminución y casi pérdida de las playas existentes en el sector".	Bastante Probable
Inundación por lluvia (pluvial)	La presencia mínima de precipitaciones en el puerto es un parámetro para detener las operaciones y actividades que se estén realizando al aire libre. Deterioro de los patios de carbón y patio de carga general por causa de los vehículos que transitan y las grúas de carga, respectivamente, (entrevista Jefe de mantenimiento). De acuerdo con estudios realizados por el PNUD, citado por Ramirez , Acosta y Velez (2017) una de las zonas más afectadas del país con inundaciones es la ciudad de Barranquilla, por su hidrología la cual se compone principalmente del Río Magdalena, La Ciénaga de Mallorquín y sus arroyos.	Bastante Probable
Tormenta Eléctrica	El puerto tiene la probabilidad anual de recibir el impacto de una descarga atmosférica y debe protegerse del riesgo de perder bienes materiales, operacionales y humanas. En caso de presentarse una tormenta eléctrica el personal debe resguardarse. La terminal cuenta con dos pararrayos de protección a su personal, infraestructura y maquinarias y equipos. Estas se producen normalmente como consecuencia de otros fenómenos como ciclones y huracanes de la zona norte del mar Caribe. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH).	Bastante Probable
Vendaval (ráfagas de viento)	El aumento de la temperatura y los cambios de presión en la atmósfera forman corrientes de viento, que en ocasiones, adquieren grandes velocidades afectando todo a su paso. Los vientos Alisios afectan la zona del Ecuador y generalmente tiene una fuerza moderada, cuando se encuentra por encima de los 20 nudos se detiene cualquier operación fluvial.	Bastante Probable

AMENAZA	DESCRIPCIÓN	Probabilidad de ocurrencia
Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)	Según el informe de gestión de Compas 2022, el incremento en la temperatura puede generar un aumento en el consumo de energía por uso de aires acondicionados y los combustibles fósiles almacenados. Además, la evaluación de los peligros del estrés térmico por calor en el entorno laboral, relacionado con el calentamiento global (Moreno, 2023). Se determina con la temperatura y la humedad Ver <a href="https://www.noaa.gov/heat-index">Heat Index Calculation (noaa.gov)</a>	Bastante probable

Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

La tabla 39 muestra la probabilidad de ocurrencia de los impactos identificados

**Tabla 39**

*Probabilidad de ocurrencia efectos climáticos y su impacto en puerto COMPAS Barranquilla*

Amenazas / Actividades	Variación nivel del río	Sedimentación por erosión/ socavación de márgenes del puerto	Inundación por lluvia (pluvial)	Tormenta Eléctrica	Vendaval (ráfagas de viento)	Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)
Infraestructura Portuaria	9	9	9	9	7	4
Equipos Portuarios	4	3	7	7	9	4
Operatividad Portuaria	7	9	9	9	7	7
Carga, descarga, transporte carga	7	7	9	9	7	7
Almacenamiento de carga	4	3	7	7	7	7
Relacionamiento comunidades	3	3	3	3	3	5
Seguridad, salud en el trabajo	7	3	7	7	7	9

Nota: La calificación se probabilidad de ocurrencia corresponde a: 3: Improbable, 4: Muy poco probable, 5: Poco probable, 7: Probable, 9: Bastante probable, 10: Muy probable. Fuente: Elaboración del autor a partir de análisis interno y externo en puerto COMPAS Barranquilla (2023)

Con el fin de valorar las consecuencias de la materialización de los impactos, se emplearon los valores descritos en la tabla 40.

**Tabla 40**

*Calificación de la consecuencia de materialización del impacto*

<b>Valor</b>	<b>Grado</b>	<b>Consecuencias económicas y de operatividad en activos.</b>	<b>Daños físicos</b>	<b>Consecuencias en materia de seguridad</b>
<b>0</b>	Despreciable	Sin repercusiones	Sin daños	Sin repercusiones
<b>3</b>	Mínima	Irrelevantes en las cuentas anuales del activo	Irrelevantes	Sin repercusiones
<b>4</b>	Menor	Repercusiones en las cuentas anuales del activo asumibles sin dificultad	Leves	Sin repercusiones
<b>5</b>	Significativa	Notables en las cuentas anuales del activo, pero asumibles	Notables	Sin repercusiones
<b>7</b>	Importante	Importantes repercusiones en las cuentas anuales del activo, asumibles con mayor dificultad, que en el grado de impacto anterior	Importantes pero asumibles	Sin repercusiones
<b>9</b>	Grave	Graves repercusiones en las cuentas anuales, llegándose a contemplar la posibilidad de cierre del activo	Difíciles de asumir	De poca envergadura y asumibles
<b>10</b>	Muy grave	Las repercusiones económicas exigen el cierre o renovación total del activo	No asumibles	Puede tener repercusiones no asumibles

*Nota.* Fuente: Elaboración propia basado en el Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016)

Los resultados del análisis de ocurrencia se muestran en la tabla 41.

**Tabla 41**

*Nivel de gravedad de las consecuencias según ocurrencia de los impactos en puerto COMPAS Barranquilla*

Actividades	Amenazas					
	Variación nivel del río	Sedimentación por erosión/ socavación de márgenes del puerto	Inundación por lluvia (pluvial)	Tormenta Eléctrica	Vendaval (ráfagas de viento)	Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar )
<b>Infraestructura Portuaria</b>	9	7	7	4	7	3
<b>Equipos Portuarios</b>	3	3	5	5	7	3
<b>Operatividad Portuaria</b>	5	5	5	5	7	4
<b>Carga, descarga, transporte carga</b>	5	5	9	9	7	10
<b>Almacenamiento de carga</b>	5	5	7	7	7	4
<b>Relacionamiento comunidades</b>	3	3	3	3	3	10
<b>Seguridad, salud en el trabajo</b>	3	3	5	9	9	10

*Nota:* Nivel de gravedad es: 0: Despreciable, 3: Mínima, 4: Menor, 5: Significativa, 7: Importante, 9: Grave, 10: Muy grave. Fuente: Elaboración del autor a partir de análisis interno y externo en puerto COMPAS Barranquilla (2023)

La calificación cuantitativa del índice de riesgo climático empresarial expresa la posibilidad de que la amenaza genere un impacto y un daño potencial y muestra la escala de valores que precisan o no intervención dependiendo de las consecuencias estimadas (Tabla 42).

**Tabla 42***Magnitud del Índice de Riesgo Climático Empresarial (IRCE)*

Índice de riesgo	Consecuencia						
	Despreciable	Mínima	Menor	Significativa	Importante	Grave	Muy grave
Improbable	0	9	12	15	21	27	30
Muy poco probable	0	12	16	20	28	36	40
Poco probable	0	15	20	25	35	45	50
Probable	0	21	28	35	49	63	70
Bastante probable	0	27	36	45	63	81	90
Muy Probable	0	30	40	50	70	90	100

*Nota.* Fuente: Elaboración propia basado en el Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016)

El valor IRCE obtenido permite identificar los elementos de éxito del sistema con mayor riesgo frente al evento meteorológico considerado amenaza. De acuerdo con la magnitud IRCE se categoriza el riesgo desde despreciable hasta muy alto y se relaciona dicho valor con la necesidad de priorización de las acciones (Tabla 43).

**Tabla 43***Caracterización del riesgo climático empresarial IRCE para priorización de acciones*

Riesgo	Magnitud	Categoría	Tipología	Priorización
Muy Alto	>90	5	R5	Urgente evaluar acciones
Alto	51-90	4	R4	Necesario evaluar acciones
Medio	31-50	3	R3	Recomendable evaluar acciones
Bajo	21-30	2	R2	Seguimiento necesario, no tanto evaluar acciones
Muy bajo	0-20	1	R1	No necesario evaluar acciones
Despreciable	0	0	R0	Riesgo despreciable

*Nota.* Fuente: Elaboración propia basado en el Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016)

Los resultados IRCE para el puerto COMPAS de Barranquilla se muestran en la tabla 44.

**Tabla 44**

*Índice de Riesgo Climático Empresarial (IRCE) de COMPAS Barranquilla*

Amenazas	Variación nivel del río			Sedimentación por erosión/ socavación de márgenes del puerto			Inundación por lluvia (pluvial)			Tormenta Eléctrica			Vendaval (ráfagas de viento)			Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar )		
	PO	CE	IRC	PO	CE	IRC	PO	CE	IRC	PO	CE	IRC	PO	CE	IRC	PO	CE	IRC
Actividades																		
Infraestructura Portuaria	9	9	81	9	7	63	9	7	63	9	4	36	7	7	49	4	3	12
Equipos Portuarios	4	3	12	3	3	9	7	5	35	7	5	35	9	7	63	4	3	12
Operatividad Portuaria	7	5	35	9	5	45	9	5	45	9	5	45	7	7	49	7	4	28
Carga, descarga, transporte carga	7	5	35	7	5	35	9	9	81	9	9	81	7	7	49	7	4	28
Almacenamiento de carga	4	5	20	3	5	15	7	7	49	7	7	49	7	7	49	7	10	70
Relacionamiento comunidades	3	3	9	3	3	9	3	3	9	3	3	9	3	3	9	5	10	50
Seguridad, salud en el trabajo	7	3	21	3	3	9	7	5	35	7	9	63	7	9	63	9	10	90

Nota: PO: Probabilidad de ocurrencia CE: Consecuencias esperadas IRC: Índice de Riesgo  
 Fuente: Elaboración propia basado en el Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016)

### 7.1.5.2. Cálculo de la Vulnerabilidad Climática Empresarial - VuCE

Las medidas que buscan reducir la vulnerabilidad de los sistemas ante el impacto generado por las amenazas derivadas de los eventos meteorológicos y del cambio climático, que para el sector portuario se relaciona con la capacidad de aprovechar las oportunidades derivadas de las condiciones climáticas de su entorno, atenuar los daños mediante recursos, tecnología, innovación o modificaciones en los procesos existentes. Para realizar lo anterior se establecen cinco (5) variables que relacionan el nivel de planificación, ellas son:

1. Variables transversales: planificación gubernamental y empresarial
2. Variable de recursos económicos
3. Variables de infraestructuras y tecnología
4. Variable de información dentro de la empresa
5. Variable de conocimiento

La calificación de esta capacidad se resume en la tabla 45.

**Tabla 45**

*Valoración de la capacidad de adaptación*

<b>Capacidad de adaptación</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Valoración</b>
<b>Despreciable</b>	CA0	10
<b>Mínima</b>	CA1-2	7
<b>Media</b>	CA3	4
<b>Significativa</b>	CA4	3
<b>Importante</b>	CA5	1

*Nota:* CA0: No se dispone de ninguna variable CA1-2: Se dispone de una o dos variables CA3: Se dispone de tres variables CA4: Se dispone de cuatro variables CA5: Se dispone de cinco variables. Fuente: Elaboración propia basado en el Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016)

La siguiente es la evaluación de la capacidad adaptativa de las diferentes actividades del puerto. La calificación de esta capacidad se resume en la tabla 46.

**Tabla 46**

*La capacidad de adaptación de las actividades del Puerto COMPAS Barranquilla*

		Capacidad de Adaptación para el Puerto COMPAS Barranquilla							
Actividades	Amenazas	Infraestructura Portuaria y Equipos Portuarios	CA	Operatividad Portuaria, Carga, descarga, transporte carga y Almacenamiento de carga.	CA	Relacionamiento comunidades	CA	Seguridad, salud en el trabajo	CA
		Variación del Nivel del río	Realizar los estudios y diseños para la elevación de los muelles 1,2,3, y 4.	2	Adquirir una estación metereológica que permita monitorear en tiempo real los fenómenos climáticos.	3			
					Conservación y restauración de la Ciénaga Mallorquin y la Isla Salamanca, como receptoras naturales de inundaciones.	2			
Actualizar la cartografía del puerto con los escenarios climáticos pronosticados para el año 2030	2								
Sedimentación por erosión/ socavación de márgenes del puerto	Realizar una revisión periódica a los pilotes de los muelles y realizar mantenimiento preventivo.	2	Realizar dragados cuando se considere necesario para mantener el calado de 10 metros de profundidad.	4	Crear con las comunidades aledañas, universidades de la región, y el apoyo del Cormagdalena, iniciativas para la conservación de la cuenca del Río Magdalena	3			
	Realizar estudios de geotécnica e hidrodinámica, para conocer el comportamiento del río durante los eventos climáticos sea de lluvia o sequía. De la misma manera conocer el terreno para la proyección de nuevas construcciones.	2	Realizar un trabajo conjunto con las demás terminales, Cormagdalena y las autoridades locales y departamentales para el control de la Tarulla en la orilla del río.	2					

		Capacidad de Adaptación para el Puerto COMPAS Barranquilla							
Actividades	Infraestructura Portuaria y Equipos Portuarios	CA	Operatividad Portuaria, Carga, descarga, transporte carga y Almacenamiento de carga.	CA	Relacionamiento comunidades	CA	Seguridad, salud en el trabajo	CA	
Amenazas									
Inundación por lluvia (pluvial)			Realizar un estudio con la academia para desarrollar soluciones en las vías de los patios de carbón y carga, que disminuya el costo de mantenimiento actual.	2			Actualizar el Plan de Manejo Ambiental y el Plan de contingencia del puerto.	4	
	Adoptar medidas de mejora en el sistema de drenaje.	4	Actualizar el Reglamento Condiciones Tecnicas Operativas_RCTO	4			Procedimientos de seguridad para permanecer en los edificios o cerca de ellos, durante las condiciones climáticas adversas.	4	
	Realizar un reporte periódico sobre reparaciones que involucren variables climáticas, que permitan analizar los datos históricos	4							
	Mantener actualizados los seguros con cubrimientos en temas de riesgos climáticos.	3	Revisar los planes de evacuación y continuidad de operaciones durante los fenómenos extremos.	3			Capacitar con frecuencia al personal para saber actuar y conocer el responsable de la toma de decisiones en las situaciones que se presenten.	4	
	Realizar un programa de mantenimiento a los drenajes.	3	Implementar procedimientos de seguridad para los movimientos de carga durante condiciones climáticas adversas.	3	Prever que no existan lixiviados, residuos sólidos que la lluvia arrastre a los barrios cercanos de la zona de influencia.	3			

Capacidad de Adaptación para el Puerto COMPAS Barranquilla								
Actividades	Infraestructura Portuaria y Equipos Portuarios	CA	Operatividad Portuaria, Carga, descarga, transporte carga y Almacenamiento de carga.	CA	Relacionamiento comunidades	CA	Seguridad, salud en el trabajo	CA
Amenazas								
Tormenta Eléctrica	Mantener un sistema de alertas tempranas con las entidades idóneas.	3	Diseño e implementación de formato para registros de tormenta eléctrica en cercanías o en el puerto, con la evaluación de posibles daños y afectaciones a la infraestructura, operación y personal del mismo.	2			Actualizar el Reglamento Condiciones Técnicas Operativas_RCTO	2
	Hacer una evaluación de daños por evento climático y tomar medidas correctivas.	4						
Vendaval (ráfagas de viento)			Articular con otros terminales un sistema de alerta temprana.	3				
	Para controlar el polvo carbón, implementar cubrimientos de las pilas mientras son llevadas al cargue.	3					Diseño y montaje de una cerca viva uno de los costados de Plaza Carbón, como barrera para retener el material particulado.	2
							Ampliar la red de aspersores para mantener humectadas las pilas de carbón y mantener así el mínimo de partículas suspendidas en el aire.	2
	Registro de mantenimiento preventivos y correctivos de daños por vientos.	4					Crear protocolos para los trabajadores que se encargan del destape y descargue del carbón que entra al puerto.	4

		Capacidad de Adaptación para el Puerto COMPAS Barranquilla							
Actividades	Infraestructura Portuaria y Equipos Portuarios	CA	Operatividad Portuaria, Carga, descarga, transporte carga y Almacenamiento de carga.	CA	Relacionamiento comunidades	CA	Seguridad, salud en el trabajo	CA	
Amenazas									
	Realizar planes de reposición y registro de vida útil de la maquinaria y equipos para permitir la adquisición y reemplazo de la maquinaria depreciada.	2							
Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)			Llevar un registro de las altas temperaturas hacer un estudio cuando se considere.	4					
	Instalar tejados que ayuden a disminuir el calor al interior de la edificación.	3	Implementar procedimientos detallados de revisión de calidad para productos perecederos, antes, durante y después de condiciones de altas temperaturas.	4		Realizar jornadas más cortas en Plaza Carbón teniendo en cuenta las altas temperaturas que se generan al interior del patio.	3		
					Crear una red de comunicación directa con las comunidades aledañas	3			
	Implementar medidas de aislamiento térmico para reducir la transferencia de calor desde el exterior.	3	Continuar las auditorías para conocer el consumo de energía en toda la terminal.	4	Realizar jornadas de capacitación sobre el cambio climático, las amenazas, riesgos y mitigación a la comunidad en zona de influencia directa, al igual que los clientes internos de la compañía.	2	Realizar un protocolo de autocuidado, cuando el empleado se encuentre dentro de Plaza Carbón, los silos, las bodegas y oficinas.	2	

		Capacidad de Adaptación para el Puerto COMPAS Barranquilla							
Actividades	Infraestructura Portuaria y Equipos Portuarios	CA	Operatividad Portuaria, Carga, descarga, transporte carga y Almacenamiento de carga.	CA	Relacionamiento comunidades	CA	Seguridad, salud en el trabajo	CA	
Amenazas									
	Instalar paneles flexibles solares que no necesitan infraestructura, se adhiere a la superficie del los techos; para suministrar ventilación al área administrativa. Ej: Heliatek	3	Adquisición de dispositivos que midan constantemente temperatura y humedad en las diferentes áreas donde se almacena el granel alimenticio.	2			Instalar puntos de hidratación en diferentes áreas del puerto, especialmente en Plaza Carbón, al igual que sistemas de nebulización para disminuir la temperatura del ambiente.	2	
	Implementar sistemas de monitoreo de temperatura en tiempo real para supervisar constantemente las condiciones dentro de bodegas y silos para tomar medidas a tiempo.	3	Actualización del Procedimiento Operativo Normalizado PON para el control de calidad de los graneles alimenticios.	2					

*Nota.* Fuente: Elaboración propia basado en el Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016)

La vulnerabilidad climática empresarial VuCE, se encuentra en función de la probabilidad de ocurrencia del impacto, como de la consecuencia de la ocurrencia determinando el Índice de responsabilidad empresarial IRSE frente a la capacidad de adaptación (CA). El VuCE se puede obtener mediante el cálculo:

$$VuCE = IRSE * CA$$

Los valores de VuCE varían entre 0 y 1000, mientras que el valor de la capacidad de adaptación (CA) varía entre 1 y 10 y el IRSE entre 0 y 100 (Tabla 47).

**Tabla 47***Categorización de la Capacidad de adaptación vs. tipología de riesgo*

VuCE		Capacidad de Adaptación CA				
		Despreciable	Mínima	Menor	Significativa	Importante
		CA0	CA1	CA2	CA3	CA4
Tipología de riesgo	R0	0	0	0	0	0
	R1	200	140	80	60	20
	R2	300	210	120	90	30
	R3	500	350	200	150	50
	R4	900	630	360	270	90
	R5	1000	700	400	300	100

*Nota.* Fuente: Elaboración propia basado en el Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016)

La calificación de vulnerabilidad de un sistema obtenido del VuCE se puede categorizar por la clasificación de la tabla 48.

**Tabla 48***Categorización de la Vulnerabilidad Climática empresarial*

Riesgo	Magnitud	Clase	Tipología
Muy Alto	>700	5	V5
Alto	>500-700	4	V4
Medio	>300-500	3	V3
Bajo	>100-300	2	V2
Muy bajo	>0-100	1	V1
Despreciable	0	0	V0

*Nota. Fuente:* Elaboración propia basado en el Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016)

Una vez aplicada la fórmula para hallar la magnitud de la Vulnerabilidad Climática Empresarial - VuCE del puerto de COMPAS Barranquilla, como se muestra en la tabla 49

**Tabla 49**

*Magnitud de la Vulnerabilidad Climática Empresarial del puerto COMPAS Barranquilla*

Amenazas	Variación nivel del río			Sedimentación por erosión/ socavación de márgenes del puerto			Inundación por lluvia (pluvial)			Tormenta Eléctrica			Vendaval (ráfagas de viento)			Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)		
	IRC	CA	VuCE	IRC	CA	VuCE	IRC	CA	VuCE	IRC	CA	VuCE	IRC	CA	VuCE	IRC	CA	VuCE
Actividades																		
<b>Infraestructura Portuaria</b>	81	7	567	63	7	441	63	7	441	36	4	144	49	4	196	12	3	36
<b>Equipos Portuarios</b>	12	4	48	9	7	63	35	4	140	35	4	140	63	7	441	12	3	36
<b>Operatividad Portuaria</b>	35	7	245	45	4	180	45	7	315	45	7	315	49	4	196	28	4	112
<b>Carga, descarga, transporte carga</b>	35	4	140	35	4	140	81	7	567	81	7	567	49	7	343	28	3	84
<b>Almacenamiento de carga</b>	20	3	60	15	4	60	49	4	196	49	4	196	49	4	196	70	7	490
<b>Relacionamiento comunidades</b>	9	4	36	9	4	36	9	3	27	9	3	27	9	3	27	50	7	350
<b>Seguridad, salud en el trabajo</b>	21	4	84	9	3	27	35	3	105	63	7	441	63	4	252	90	7	630

*Nota.* Fuente: Elaboración propia basado en el Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016)

Conociendo la magnitud del VuCE de la terminal se procede a calificarla por su tipología para encontrar el riesgo en el que se encuentra, como se establece en la Tabla 50.

**Tabla 50**

*Calificación de la tipología y el riesgo por la magnitud de VuCE del puerto de COMPAS Barranquilla*

Amenazas	Variación nivel del río		Sedimentación por erosión/ socavación de márgenes del puerto		Inundación por lluvia (pluvial)		Tormenta Eléctrica		Vendaval (ráfagas de viento)		Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)	
	IRC	VuCE	IRC	VuCE	IRC	VuCE	IRC	VuCE	IRC	VuCE	IRC	VuCE
Actividades												
<b>Infraestructura Portuaria</b>	Alto	V4	Alto	V3	Alto	V3	Medio	V2	Medio	V2	Muy Bajo	V1
<b>Equipos Portuarios</b>	Muy Bajo	V1	Muy Bajo	V1	Medio	V2	Medio	V2	Alto	V3	Muy Bajo	V1
<b>Operatividad Portuaria</b>	Medio	V2	Medio	V2	Medio	V3	Medio	V3	Medio	V2	Bajo	V2
<b>Carga, descarga, transporte carga</b>	Medio	V2	Medio	V2	Alto	V4	Alto	V4	Medio	V3	Bajo	V1
<b>Almacenamiento de carga</b>	Bajo	V1	Muy Bajo	V1	Medio	V2	Medio	V2	Medio	V2	Alto	V3
<b>Relacionamiento con comunidades</b>	Muy Bajo	V1	Muy Bajo	V1	Muy Bajo	V1	Muy Bajo	V1	Muy Bajo	V1	Alto	V3
<b>Seguridad, salud en el trabajo</b>	Bajo	V1	Muy Bajo	V1	Medio	V2	Alto	V3	Alto	V3	Alto	V4

*Nota.* Fuente: Elaboración propia basado en el Plan de Gestión del Cambio Climático para los Puertos Marítimos de Colombia (2016)

Los cálculos realizados mediante el IRSE y VuCE evidencian que los impactos más notables se presentan durante la operatividad, carga, descarga, movilización de carga. En este contexto, se observa que los riesgos potenciales son elevados en caso de lluvias extremas, indicando la necesidad de implementar medidas adaptativas para prevenir posibles afectaciones a la operación, especialmente en lo que respecta a la carga de carbón, coque y graneles sólidos y a las operaciones portuarias en general.

Las ráfagas de viento, que tienen una ocurrencia considerable a lo largo del año, generan un impacto importante tanto en la infraestructura, como en el equipo portuario, generando riesgos altos para el personal que opera en el puerto realizando el izaje.

En cuanto al análisis de los resultados del VuCE para las actividades portuarias, se señala que la vulnerabilidad predominante se relaciona con la presencia de tormentas eléctricas, las operaciones base del puerto y la movilización de carga.

Las ráfagas de viento y las tormentas eléctricas representan otro aspecto de gran vulnerabilidad según el VuCE, ya que evidencian los daños que las ráfagas de viento causan a los techos de las bodegas de almacenamiento, lo cual conlleva a reparaciones frecuentes en las láminas. De manera similar, los equipos utilizados para el izaje de contenedores pueden presentar una alta vulnerabilidad, y en episodios de vientos fuertes, las operaciones, así como la seguridad de los operarios, pueden resultar afectadas.

#### 8. PLAN DE INTERVENCIÓN PARA LA ADOPCIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PUERTO COMPAS BARRANQUILLA

La planificación de estrategias de adaptación en la industria portuaria debe dirigirse hacia los aspectos más críticos afectados por las amenazas meteorológicas derivadas de la ubicación, así como los factores determinados por la variabilidad climática y el cambio climático. Para asegurar la resiliencia y preparación del sector portuario, resulta fundamental enfocarse en tres áreas clave: la adaptación de infraestructuras y operaciones, la mitigación de las causas del cambio climático y la preservación del medio ambiente. Este enfoque permite atenuar los impactos negativos a corto, mediano y largo plazo relacionados con fenómenos meteorológicos, garantizando que este sector económico crucial para los municipios y el país siga siendo funcional y eficiente, incluso frente a condiciones meteorológicas adversas (MADS, 2016).

Dada la creciente importancia de los impactos del cambio climático, la planificación y preparación en todos los ámbitos se vuelven cada vez más imperativas, adoptando un enfoque preventivo y de fortalecimiento que asegure la seguridad y confiabilidad de los puertos en línea

con los planes territoriales que aborden los desafíos climáticos, especialmente en el contexto actual del Puerto de Barranquilla.

### **8.1. Medidas de adaptación identificadas**

En la tabla 51 se presentan las medidas de adaptación y los resultados esperados.

**Tabla 51**

*Medidas de adaptación al cambio climático en el puerto COMPAS Barranquilla*

<b>Amenaza</b>	<b>Impactos posibles de eventos y efectos asociados al cambio climático</b>	<b>Medidas de adaptación identificadas</b>	<b>Resultados esperados</b>	<b>Apoyos legales y/o institucionales</b>
Variación del nivel del río	Afectación en la navegación, el atraque y manejo de carga debido a los cambios de línea de costa por inundación parcial de los muelles 1, 2, 3 y 4	Realizar los estudios y diseños de las obras de elevación de los muelles 1, 2, 3 y 4. con el conocimiento que para el 2050 una parte del muelle se vería bajo los niveles del río.	Evaluar la posibilidad de adoptar esta medida antes o después de la línea de tiempo propuesta en el presente estudio, debido a la alta incertidumbre que rodea los eventos climáticos a corto, mediano y largo plazo.	Normativa de construcción Ley 1242 de 2008 por la cual se establece el Código Nacional de Navegación y Actividades Portuarias Fluviales. IPPCC 2023, UNCTAD
Sedimentación por erosión/ socavación de márgenes del puerto	Cambios en la línea de costa	Revisar periódicamente los pilotes de los muelles para prevenir la exposición de las bases y genere inestabilidad de la estructura.	Evitar el deterioro de los materiales y cimientos del muelle, al igual que la erosión en la costa.	NTC vigente en construcción. Normativa del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de Transporte.
	Suspensión de la navegación como consecuencia de la alta sedimentación en la entrada al puerto de Barranquilla	Realizar estudios de geotécnica e hidrodinámica, para conocer el comportamiento del río durante los eventos climáticos de lluvia y/o sequía. Adicionalmente permite estudiar la zona para la proyección de nuevas construcciones.	Conocer el comportamiento del río y la calidad de sus suelos, para usarlo en beneficio de la operación de la Terminal.	Normativa del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Inundación por lluvia (pluvial)	Interrupción de la operatividad del puerto, en los procesos de carga, descarga y transporte, debido a la lluvia.	Realizar un estudio con la academia para desarrollar soluciones en las vías de los patios de carbón y carga, que disminuya el costo de mantenimiento actual.	Disminuir del rubro dentro del presupuesto mensual del puerto destinado al mantenimiento de las vías.	Manual de vías terciarias del INVIAS. Investigaciones en tipos de pavimentos resistentes y con alta tecnología.
Tormenta Eléctrica	Interrupción de la operatividad del puerto, en los procesos de carga, descarga y transporte y en la seguridad del personal debido a tormentas eléctricas	Diseño e implementación de formato para registros de tormenta eléctrica en cercanías o en el puerto, con la evaluación de posibles daños y afectaciones a la infraestructura, operación y personal del mismo.	Lograr obtener datos históricos que permitan mostrar una tendencia y reconocer donde están sus debilidades en infraestructura, maquinaria y equipos que afectan el desarrollo del negocio.	Normativa sobre infraestructura resiliente. Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. UNDRR, 2023

Amenaza	Impactos posibles de eventos y efectos asociados al cambio climático	Medidas de adaptación identificadas	Resultados esperados	Apoyos legales y/o institucionales
	Afectación en la salud y seguridad en el trabajo de los empleados y contratistas del puerto por eventos climáticos como Tormenta Eléctrica, vientos huracanados, ráfagas de viento, entre otros.	Actualizar el Reglamento Condiciones Técnicas Operativas _ RCTO	Conocer el manejo del evento climático extremo respecto a la operación y sus procedimientos.	Realizar la presentación del nuevo documento autorizado ante las entidades correspondientes. CRA
Vendaval (ráfagas de viento)	Afectación a la comunidad de la zona de influencia por emisión de material particulado debido a los fuertes viento.	Diseño y montaje de una cerca viva uno de los costados de Plaza Carbón, como barrera para retener el material particulado y generar sombra que mitigue las altas temperaturas.	Detener la contaminación del aire a raíz del material particulado y los fuertes vientos que lo dispersan en el ambiente.	CONPES 3344 de 2005 del Ministerio del Medio Ambiente Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire. Resolución 2254 de 2017 norma de calidad del aire. Protocolos y guía de procedimiento para el control de polvo de carbón y metano del Ministerio de Minas y Energía.
	Daño a equipos e instalaciones portuarias a causa de ráfagas de viento.	Realizar planes de reposición y registro de vida útil de la maquinaria y equipos para permitir la adquisición y reemplazo de la maquinaria depreciada.	Planear las nuevas adquisiciones por reposición de maquinaria y equipos depreciados.	Oficio 025415 de 2019 - Bienes Depreciables
Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)	Afectación en la salud y seguridad en el trabajo de los empleados del puerto por las altas temperaturas.	Realizar jornadas de capacitación sobre el cambio climático, las amenazas, riesgos y mitigación a la comunidad en zona de influencia directa, al igual que los clientes internos de la compañía.	Compartir el conocimiento e involucrar a los clientes internos y externos en las metas globales para combatir el cambio climático.	IPPC 2023, UNCTAD, Tercera comunicación nacional sobre el cambio climático.
		Instalar puntos de hidratación en diferentes áreas del puerto, especialmente en Plaza Carbón, al igual que sistemas de nebulización de agua para contribuir a la disminución de la temperatura del ambiente.	Cuidar de bienestar de los trabajadores en condiciones extremas de su oficio.	Guía para la Identificación de Actividades de Alto Riesgo, definidas en el Decreto 2090 del 2003. Monitorear el HEAT INDEX. Recomendaciones de la Organización Internacional del Trabajo (OIT). Cumplimiento de la normativa para trabajos a altas temperaturas.

Amenaza	Impactos posibles de eventos y efectos asociados al cambio climático	Medidas de adaptación identificadas	Resultados esperados	Apoyos legales y/o institucionales
		Realizar un protocolo de autocuidado, cuando el empleado se encuentre dentro de Plaza Carbón, los silos, las bodegas y oficinas.	Lograr que los empleados laboren en las condiciones óptimas que su trabajo les permita y evitar accidentes por golpes de calor y/o deshidratación.	Guía para la Identificación de Actividades de Alto Riesgo, definidas en el Decreto 2090 del 2003. Monitorear el HEAT INDEX.
	Modificaciones en características organolépticas de los graneles alimenticios por las altas temperaturas.	Actualización del Procedimiento Operativo Normalizado PON para el control de calidad de los graneles alimenticios.	Conocer la identificación, el manejo adecuado y control de agentes extraños en el granel como hongos, insectos, contaminación.	Monitorear el HEAT INDEX. Sistemas de calidad ICONTEC.
		Adquisición de dispositivos que midan constantemente temperatura y humedad en las diferentes áreas donde se almacena el granel alimenticio.	Permitir tener el control de calidad para el manejo de productos perecederos como los graneles que maneja la compañía, y tomar decisiones a tiempo.	Monitorear el HEAT INDEX. Sistemas de calidad ICONTEC.

*Nota.* Fuente: Elaboración propia basado Hoja de ruta para la elaboración de los planes de adaptación dentro del plan nacional de adaptación al cambio climático (2013)

Específicamente, estas medidas contemplan los siguientes aspectos que se resumen en la tabla 52

**Tabla 52**

*Propuesta de plan general de evaluación de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático*

<b>Amenaza</b>	<b>Impactos posibles de eventos y efectos asociados al cambio climático</b>	<b>Medidas de adaptación identificadas</b>	<b>Valor Total</b>
Cinco amenazas Climáticas	Diez (10) impactos posibles para el puerto	Trece (13) medidas de adaptación propuestas	\$310.500.000

*Nota.* Fuente: Elaboración propia basado Hoja de ruta para la elaboración de los planes de adaptación dentro del plan nacional de adaptación al cambio climático (2013)

## 8.2. Cronograma y costos

En la tabla 53 se encuentran el cronograma propuesto para desarrollar las actividades y su costo para desarrollarlas:

**Tabla 53**

*Plan de Implementación, costos e Indicadores de seguimiento*

Amenaza	Impactos posibles de eventos y efectos asociados al cambio climático	Medidas de adaptación identificadas	variable	Indicador	Costos	Tipo de recurso	Responsable	Avance por Año																			
								Corto				Mediano Plazo												Largo Plazo			
								Año1				Año 2			Año 3			Año 4			Año 5			Año 6 al 10			
								Avance por Trimestre																Avance Año			
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	6	7	8	9	10			
Variación del nivel del río	Afectación en la navegación, el atraque y manejo de carga debido a los cambios de línea de costa por inundación parcial de los muelles 1, 2, 3 y 4	Realizar los estudios y diseños de las obras de elevación de los muelles 1, 2, 3 y 4. con el conocimiento que para el 2050 una parte del muelle se vería bajo los niveles del río. <b>Nota:</b> Se recomienda evaluar la posibilidad de adoptar esta medida antes de la línea de tiempo propuesta en el presente estudio, debido a la alta incertidumbre que rodea los eventos climáticos a corto, mediano y largo plazo.	Infraestructura Operaciones Carga	Estudios realizados	\$130.000.000	Propios	COMPAS Barranquilla																				
Sedimentación por erosión/ socavación de márgenes del puerto	Cambios en la línea de costa	Revisar periódicamente los pilotes de los muelles para prevenir la exposición de las bases y genere inestabilidad de la estructura.	Infraestructura Operaciones Carga Personas Ambiental	Número Revisiones realizadas	Sin valor – Se propone como una actividad complementaria del empleado encargado del mantenimiento en el puerto.	N/A	COMPAS Barranquilla																				







Amenaza	Impactos posibles de eventos y efectos asociados al cambio climático	Medidas de adaptación identificadas	variable	Indicador	Costos	Tipo de recurso	Responsable	Avance por Año																	
								Corto				Mediano Plazo								Largo Plazo					
								Año 1		Año 2		Año 3		Año 4		Año 5		Año 6 al 10							
								Avance por Trimestre												Avance Año					
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	6	7	8	9	10	
Modificaciones en características organolépticas de los graneles alimenticios por las altas temperaturas.	Actualización del Procedimiento Operativo Normalizado PON para el control de calidad de los graneles alimenticios.	Infraestructura Operaciones Carga Personas Ambiental	Documento actualizado	Sin valor – Se propone como una actividad complementaria del equipo encargado de la seguridad y salud en el trabajo dentro del puerto.	N/A	COMPAS Barranquilla																			
	Adquisición de dispositivos que midan constantemente temperatura y humedad en las diferentes áreas donde se almacena el granel alimenticio.	Infraestructura Operaciones Carga Personas Ambiental	Dispositivos comprados	\$ 4.500.000	N/A	COMPAS Barranquilla																			
<b>Total Plan de Implementación</b>					<b>\$ 310.500.000</b>																				

Nota. Fuente: Elaboración del autor (2023)

### **8.3. Seguimiento, monitoreo y evaluación**

Este proceso de seguimiento y evaluación cobra importancia significativa, ya que anticipa la necesidad de una mejora continua en las propuestas del plan, alineada con el avance constante de la información científica sobre el cambio climático. En este sentido, se sugieren revisiones anuales y cohortes de revisión a corto, mediano y largo plazo, conforme a los plazos establecidos en la tabla anterior. Esta metodología permite ajustes oportunos y adaptativos, asegurando la vigencia y pertinencia del plan en un entorno dinámico.

## **9. CONCLUSIONES**

Los puertos marítimos y fluviales son infraestructuras estratégicas y motores económicos que deben adaptarse al cambio climático para garantizar su resiliencia y continuidad operativa. La evaluación de su vulnerabilidad mediante la metodología del Plan de gestión del cambio climático para los puertos marítimos de Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016) es clave para establecer cuáles son los riesgos más significativos a los que se enfrenta el sector portuario ante las condiciones meteorológicas que impone su ubicación y el cambio climático con el objeto de diseñar e implementar medidas de adaptación efectivas y específicas para cada puerto. En el desarrollo de esta investigación se establecieron los instrumentos de planeación a nivel nacional, regional y municipal con los cuales cuenta el territorio donde se encuentra el puerto COMPAS Barranquilla, encontrando que normativamente el país está alineado con el cumplimiento de los ODS de la Agenda 2030, y por tal razón, ha desarrollado herramientas desde los ministerios como el de Transporte y Medio Ambiente para que las empresas adapten sus operaciones a las nuevas situaciones que se avecinan por culpa del cambio climático. Adicionalmente, conocer la estructura organizacional de la compañía y su apropiación de los conceptos sobre la situación a la que se enfrentan. COMPAS es una organización que desarrolla sus actividades dentro de uno de los sectores más importantes del país; el sector transporte, el

cuál permite el correcto funcionamiento de todos los demás. Con sus cinco terminales sobre los litorales Pacífico y Atlántico de Colombia, movilizaron para el 2022 más de siete millones de toneladas de carga.

Luego de revisar las características operativas y territoriales del puerto COMPAS Barranquilla y su perspectiva organizacional frente al cambio climático; se puede concluir que es el puerto más importante sobre el río Magdalena y comunica el mar con el interior del país por vía fluvial. El puerto abastece gran parte de la ciudad y por él ingresan las materias primas para las industrias nacionales. Se observó que en el año 2100 el río habrá subido su caudal e inundará una parte de los cuatro (4) muelles actuales. De la misma manera, las lluvias y las tormentas tropicales cada vez se presentarán con más frecuencia e inesperadamente, lo cual afectaría la infraestructura, los equipos, la operación de carga y descarga, el personal que labora en la compañía y la comunidad de la zona de influencia del puerto. Se evidencia el desconocimiento de acciones concretas que permitan hacer frente al inminente cambio climático.

Se determina la línea base del comportamiento climático del puerto a través del análisis estadístico de cinco variables como son: precipitación, temperatura, sedimentación, nivel de mar, nivel del río. Teniendo en cuenta el comportamiento de estas variables se proyecta que los periodos de lluvia y los de sequía, han venido siendo más impredecibles, dificultando las operaciones de las motonaves y los procesos de carga y descarga de productos.

Se evalúan las variables climáticas y fluviales de nivel del mar, nivel del río, sedimentación, precipitación y temperatura por periodos entre 10 y 20 años para establecer la línea base de comportamiento climático del puerto COMPAS en Barranquilla, el cual presenta una temperatura media de 27.7 °C. Las variables de nivel del río, precipitación y sedimentación presentaron una correlación positiva, resultado que permite concluir la influencia en la cantidad de sedimentación transportada por el río en temporada de lluvias, lo cual influye directamente en el calado del puerto que mantiene un promedio de 10km.

Posteriormente, el análisis y cuantificación de la vulnerabilidad permite generar información valiosa para la toma de decisiones y el diseño e implementación de las medidas de adaptación más efectivas en función de las amenazas identificadas, con mayor impacto y recurrencia. Esto incrementará la resiliencia portuaria frente a los impactos que ya son inevitables y reducirán los riesgos ante eventos extremos futuros.

Por lo anterior, se proponen trece (13) medidas de adaptación al cambio climático acorde con el grado de vulnerabilidad y los requerimientos operativos y estratégicos de las instalaciones, adicionalmente se presenta el plan para su implementación con costos, tipos de recursos, responsables de desarrollarlo y un horizonte de tiempo que debe ser evaluado nuevamente pasados cinco (5) años.

Finalmente se espera que el puerto de Barranquilla comience su carrera hacia la sostenibilidad con las herramientas entregadas para fortalecer un sector tan vulnerable a los cambios climáticos, como lo es el portuario.

## 10. RECOMENDACIONES

Se recomienda la articulación entre los diferentes actores que están llamados a crear estrategias para el sector portuario regional y nacional, eso conlleva a diferentes instrumentos de planeación que no se apoyan entre sí, por tanto, las empresas no reciben de manera clara el fortalecimiento traducido en recursos para desarrollar proyectos de inversión.

Por otra parte, se encuentra la academia nacional e internacional realizando investigaciones muy valiosas sobre cómo enfrentar el cambio climático y sin embargo es muy poca la divulgación de esta, para que llegue a manos de las compañías que conforman la cadena completa de distribución y transporte. Se recomienda a las compañías acercarse a las universidades para apoyarse en la vigilancia tecnológica que estas últimas puedan hacer y estar informadas de los nuevos procedimientos, descubrimientos e innovaciones que tiene para la industria portuaria.

Se recomienda asistir a. evento “Finanzas del Clima” organizado anualmente por el Departamento Nacional de Planeación - DNP donde se intercambia información y proyectos con cofinanciadores, lo que permite dinamizar el sector hacia la sostenibilidad de sus operaciones.

Garantizar el funcionamiento óptimo de la PTAR para el tratamiento de aguas residuales industriales que puedan generarse desde las instalaciones del puerto

Se recomienda a COMPAS impedir los vertimientos de residuos contaminantes lleguen al río Magdalena, en cumplimiento del Convenio Marpol 73/78 norma sobre los residuos peligrosos y contaminantes generados por el Sector Portuario.

Se sugiere realizar un trabajo conjunto con las demás terminales, Cormagdalena y las autoridades locales y departamentales para el control de la Tarulla en la orilla del río. Es importante conocer su comportamiento cíclico y apoyar en el control y recolección de la Tarulla para no afectar la operación de la terminal. Se debe permitir la evacuación de aguas lluvias de manera rápida y adecuada y establecer el manejo de sedimentos después de periodos de lluvia.

Establecer un sistema de alertas tempranas con los diferentes terminales que existen sobre el río Magdalena y articularse con las demás instituciones idóneas. Actuar de manera oportuna ante el evento, salvaguardando la maquinaria y equipos al igual que los trabajadores. Sistema diario de alertas del IDEAM, la DIMAR, CECOLDO, CORMAGDALENA.

Revisar y tomar medidas de mejora en el sistema de drenaje de los patios.

Por último, y no menos importante, el relacionamiento con las comunidades aledañas al puerto, evidentemente desconocen los esfuerzos de la compañía para lograr desarrollar su actividad de manera responsable con el medio ambiente y su entorno. Se recomienda un mayor acercamiento a través de capacitaciones y charlas que les permita entender su papel frente a el reto que el planeta reclama hoy, y así, tomar acción sobre la base que ¡la peor amenaza para el mundo es pensar que alguien más lo hará!

## 11. REFERENCIAS

- Arafeh-Dalmau, N., Munguia-Vega, A., Micheli, F., Vilalta-Navas, A., Villaseñor-Derbez, J. C., Précoma-de la Mora, M., Schoeman, D. S., Medellín-Ortíz, A., Cavanaugh, K. C., Sosa-Nishizaki, O., Burnham, T. L. U., Knight, C. J., Woodson, C. B., Abas, M., Abadía-Cardoso, A., Aburto-Oropeza, O., Esgro, M. W., Espinosa-Andrade, N., Beas-Luna, R. Possingham, H. P. (2023). Integrating climate adaptation and transboundary management: Guidelines for designing climate-smart marine protected areas. *One Earth*. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.10.002>
- Baubekova, A., Ahrari, A., Etemadi, H., Klöve, B., & Haghghi, A. T. (2024). Environmental flow assessment for intermittent rivers supporting the most poleward mangroves. *Science of the Total Environment*, 907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167981>
- Bouska, K. L., Houser, J. N., De Jager, N. R., Van Appledorn, M., & Rogala, J. T. (2019). Applying concepts of general resilience to large river ecosystems: A case study from the Upper Mississippi and Illinois rivers. *Ecological Indicators*, 101, 1094–1110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.02.002>
- Brooks, N. (2003). *Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework*. <https://www.researchgate.net/publication/200032746>
- Cabañas Tovar, R., Avila Sánchez, M. de J., Vargas Castilleja, R. del C., & Rolón-Aguilar, J. C. (2021). Socioeconomic vulnerability, climate change and sea level increase in Matamoros, Tamaulipas. *Economía, Sociedad y Territorio*, 21(65), 179–203. <https://doi.org/10.22136/est20211572>
- Cesar, A., Lia, L. R. B., Pereira, C. D. S., Santos, A. R., Cortez, F. S., Choueri, R. B., De Orte, M. R., & Rachid, B. R. F. (2014). Environmental assessment of dredged sediment in the major Latin American seaport (Santos, São Paulo - Brazil): An integrated approach. *Science of the Total Environment*, 497–498, 679–687. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.037>

CEPAL, & Magrin, G. (2015). *Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe*.

Obtenidode

[https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/39842/S1501318\\_es.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/39842/S1501318_es.pdf)

CIOH Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, Dimar. (10 de 2020).

*Información general de Barranquilla*. Obtenido de

[https://www.cioh.org.co/images/site/principales\\_puertos/pdf/9\\_BARRANQUILLA.pdf](https://www.cioh.org.co/images/site/principales_puertos/pdf/9_BARRANQUILLA.pdf)

Colciencias, Presidencia de la República de Colombia, & Ministerio de Educación Nacional. (2019).

*Misión internacional de sabios para el avance de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación*.

[https://minciencias.gov.co/sites/default/files/libro\\_mision\\_de\\_sabios\\_digital\\_1\\_2\\_0.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/libro_mision_de_sabios_digital_1_2_0.pdf)

COMPAS. (2022). *Informe de gestión 2022*. <https://www.compas.com.co/es/sostenibilidad>

Compas. (25 de diciembre de 2023). Compañía de puertos Asociados. Obtenido de

[www.compas.com.co](http://www.compas.com.co)

Consejo nacional de política económica y social CONPES - Estrategia para la implementación de los

Objetivos De Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia. 2018.

<https://colaboracion.dnp.gov.co/cDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3918.pdf>

CORMAGDALENA (2023). Recuperado de <https://niveles.cormagdalena.gov.co/>

DANE. (2023, November). *Balanza comercial*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

[https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/balanza-](https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/balanza-comercial)

[comercial](https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/balanza-comercial)

DNP, & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023, November 23). *Plan Nacional de*

*Adaptación Al Cambio Climático*. Departamento Nacional de Planeación.

[https://www.dnp.gov.co/LaEntidad/subdireccion-general-prospectiva-desarrollo-](https://www.dnp.gov.co/LaEntidad/subdireccion-general-prospectiva-desarrollo-nacional/direccion-ambiente-desarrollo-sostenible/Paginas/plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico.aspx)

[nacional/direccion-ambiente-desarrollo-sostenible/Paginas/plan-nacional-de-adaptacion-al-](https://www.dnp.gov.co/LaEntidad/subdireccion-general-prospectiva-desarrollo-nacional/direccion-ambiente-desarrollo-sostenible/Paginas/plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico.aspx)

[cambio-climatico.aspx](https://www.dnp.gov.co/LaEntidad/subdireccion-general-prospectiva-desarrollo-nacional/direccion-ambiente-desarrollo-sostenible/Paginas/plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico.aspx)

- Elizalde Monteagudo, P. A. II Seminario Hemisférico sobre Legislación Marítima-Portuaria Abril 2018  
Montevideo, Uruguay. <https://portalcip.org/wp-content/uploads/2018/04/2-Pedro-Elizalde-Los-ODS-y-el-transporte-mar%C3%ADtimo.pdf>
- ESPO. (2023). Environmental Report 2023 Eco Ports in Sights 2023. European Sea Ports Organisation
- FCCC, C. M. (2022). WMO Provisional State of the Global Climate. Recuperado el 18 de 04 de 2023, de [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=11359](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11359)
- Ferraro, A., Marino, E., Trancone, G., Race, M., Mali, M., Pontoni, L., Fabricino, M., Spasiano, D., & Fratino, U. (2023). Assessment of environmental parameters effect on potentially toxic elements mobility in foreshore sediments to support marine-coastal contamination prediction. *Marine Pollution Bulletin*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115338>
- Fuentes Padilla, G. C., & Pretel Palacios, Z. (2021). *ANALISIS DE VULNERABILIDAD Y MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL PUERTO COMPAS TOLÚ* [Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible, Universidad EAN]. <http://hdl.handle.net/10882/11725>
- Garnier, A., & Lespez, L. (2019). Fluvial system dynamics of Sudano-Sahelian zone during the Late Holocene. The Yamé River (Dogon Country, Mali). *Geomorphology*, 340, 32–52. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.018>
- Gobert, J. (2023). Climate change and rivers: The promise offered by infrastructure. *Total Environment Research Themes*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100077>
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (Primera edición ed.).
- Hombres, L., & Boelens, R. (2018). From natural flow to 'working river': hydropower development, modernity and socio-territorial transformations in Lima's Rímac watershed. *Journal of Historical Geography*, 62, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.jhg.2018.04.001>

Hsieh, C.-H., Tai, H.-H., & Lee, Y.-N. (2014). Port vulnerability assessment from the perspective of critical infrastructure interdependency. *Maritime Policy & Management*, 41(6), 589–606.

<https://doi.org/10.1080/03088839.2013.856523>

IDB Invest. (2023). *Colombia. Country profile.*

<https://www.idbinvest.org/en/countries/colombia#overview>

IDEAM (2023). Obtenido de <https://www.ideam.gov.co/aplicativos-ideam>

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (6).

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/summary-for-policymakers/>

IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>

K.Y. Ng, A., Chen, S.-L., Cahoon, S., Brooks, B., & Yang, Z. (2013). Climate change and the adaptation strategies of ports: The Australian experiences. *Research in Transportation Business & Management*, 8, 186–194. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rtbm.2013.05.005>

Li, J., Wang, G., Li, K., Li, Y., Guo, L., & Song, C. (2023). Impacts of climate change and freeze–thaw cycles on water and sediment fluxes in the headwater region of the Yangtze River, Qinghai–Tibet Plateau. *CATENA*, 227, 107112. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107112>

Mapade. (2023). Mapas de Barranquilla. [Http://Www.Mapade.Org/Barranquilla.Html](http://Www.Mapade.Org/Barranquilla.Html).  
<http://www.mapade.org/barranquilla.html>

Ministerio de Transporte. (2023). Boletín Estadístico Tráfico Portuario en Colombia, año 2022. Bogotá: Supertransporte.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Plan de gestión del cambio Climático para los puertos marítimos de Colombia. Bogotá. Obtenido de

[https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Plan\\_nacional\\_de\\_adaptacion/Plan\\_CC\\_Puertos\\_version\\_trabajo.pdf](https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Plan_nacional_de_adaptacion/Plan_CC_Puertos_version_trabajo.pdf)

Naciones Unidas. (2022). Informe del transporte marítimo 2022. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo.

Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.

Oelze, S. (2022, August 23). *El río Rin*. Made for Minds. <https://www.dw.com/es/el-r%C3%ADo-rin/t-42030432>

Plan Nacional de Desarrollo. (2023). [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portaIDNP/PND-2023/Ley\\_2294\\_del\\_19\\_de\\_mayo\\_de\\_2023.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portaIDNP/PND-2023/Ley_2294_del_19_de_mayo_de_2023.pdf)

Palmer, M. A., Reidy Liermann, C. A., Nilsson, C., Flörke, M., Alcamo, J., Lake, P. S., & Bond, N. (2008). Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(2), 81–89. <https://doi.org/10.1890/060148>

Pery, M., Navarrete, R., Muradás, P., Puig, M., Lambrecht, N., Valencia, A. M., & Castillo, P. (2021). *Riesgo climático y puertos: Guía práctica sobre el fortalecimiento de la resiliencia*.

Ruiz Murcia, J. F., & Melo Franco, J. Y. (2024). *INFORME DE PREDICCIÓN CLIMÁTICA A CORTO, MEDIANO Y LARGO PLAZO EN COLOMBIA*. [http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new\\_modelo/CPT/informe/Informe.pdf](http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new_modelo/CPT/informe/Informe.pdf)

Sciarrillo, R., Zuzolo, D., Cicchella, D., Iannone, F., Cammino, G., & Guarino, C. (2020). Contamination and ecological risk assessment of the seaport of Naples (Italy): Insights from marine sediments. *Journal of Geochemical Exploration*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106449>

Scott, H., Mcevoy, D., Chhetri, P., Basic, F., & Mullett, J. (2013). *Climate change adaptation guidelines for ports, Enhancing the resilience of seaports to a changing climate*. RMIT University. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/guidances/climate-change-adaptation-guidelines-for-ports-enhancing-the-resilience-of-seaports-to-a-changing-climate>

- Sectorial. (2022, May 19). ¿Qué se exporta por los Puertos de Colombia? *Sectorial*. <https://sectorial.co/articulos-especiales/que-exporta-colombia-a-traves-de-sus-principales-puertos/#>
- Sierra, J. P., Genius, A., Lionello, P., Mestres, M., Möso, C., & Marzo, L. (2017). Modelling the impact of climate change on harbour operability: The Barcelona port case study. *Ocean Engineering*, 141, 64–78. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.002>
- Supertransporte. (2023). Boletín estadístico del Tráfico Portuario, año 2022. Bogotá.
- Tan, Z., Li, W., Zhang, X., & Yang, H. (2015). Service charge and capacity selection of an inland river port with location-dependent shipping cost and service congestion. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 76, 13–33. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.01.009>
- Torres, R. J., Abessa, D. M. S., Santos, F. C., Maranhão, L. A., Davanzo, M. B., do Nascimento, M. R. L., & Mozeto, A. A. (2009). Effects of dredging operations on sediment quality: Contaminant mobilization in dredged sediments from the Port of Santos, SP, Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, 9(5), 420–432. <https://doi.org/10.1007/s11368-009-0121-x>
- Tovar, B., & Wall, A. (2014). The impact of demand uncertainty on port infrastructure costs: Useful information for regulators? *Transport Policy*, 33, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.03.005>
- Ülengin, F., Işık, M., Ekici, Ş. Ö., Özaydın, Ö., Kabak, Ö., & Topçu, Y. İ. (2018). Policy developments for the reduction of climate change impacts by the transportation sector. *Transport Policy*, 61, 36–50. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.09.008>
- UNCTAD. (2017). *El Informe sobre el transporte marítimo*.
- UNCTAD. (2020). *Panorama General. Informe sobre el transporte marítimo*. [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020summary\\_es.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020summary_es.pdf)
- UNCTAD. (2023). Review of Maritime Transport 2023 (United Nations publication, Sales No. E.23.II.D.23, Geneva). <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>

UNCTAD. (22 de 04 de 2020). Conferencia de comercio y desarrollo de Naciones Unidas. Recuperado el 25 de 02 de 2023, de [https://unctad.org/system/files/official-document/cimem7d23\\_es.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/cimem7d23_es.pdf)

United Nations. (1992). UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE  
UNITED NATIONS. Obtenido de [https://unfccc.int/files/press/backgrounders/application/pdf/press\\_factsh\\_science.pdf](https://unfccc.int/files/press/backgrounders/application/pdf/press_factsh_science.pdf)

Vargas Franco, V. (2007). Estadística descriptiva para Ingeniería Ambiental con SPSS. Cali. Obtenido de <https://bit.ly/3HD1PM6>

Veenstra, A., & Notteboom, T. (2011). The development of the Yangtze River container port system. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 772–781. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.09.006>

World Meteorological Organization, W. (s.f.). Climate Knowledge for Action: A global framework for climate services.

World Meteorological Organization. (2022). State of the Climate in Latin America and the Caribbean (Vols. WMO-No 1295). Geneva: Chair, publications board WMO. Obtenido de [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=11270](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11270)

World Meteorological Organization, W. (s.f.). *Climate Knowledge for Action: A global framework for climate services*.

World Meteorological Organization, W. (s.f.). *International glossary of hydrology = Glossaire international d'hydrologie = Mezhdunarodnyĭ gidrologicheskiĭ slovar' = Glosario hidrológico internacional*.

World Meteorological Organization. (s.f.). *The global climate 2001-2010 : a decade of climate extremes : summary report*.

World Meteorological Organization (Institution/Organization). (1992). *International meteorological Vocabulary*.

Xia, W., & Lindsey, R. (2021). Port adaptation to climate change and capacity investments under uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 152, 180–204.

<https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.08.009>

Xu, Y., Wu, Y., Zhang, X., Yin, G., Fu, Y., Wang, X., Hu, Q., & Hao, F. (2021). Contributions of climate change to eco-compensation identification in the Yangtze River economic Belt, China. *Ecological Indicators*, 133, 108425.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108425>

Yang, Y. C., & Ge, Y. E. (2020). Adaptation strategies for port infrastructure and facilities under climate change at the Kaohsiung port. *Transport Policy*, 97, 232–244.

<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.06.019>

Yang, Z., Ng, A. K. Y., Lee, P. T.-Woo., Wang, T., Qu, Zhuohua., Sanchez Rodrigues, V., Pettit, S., Harris, I., Zhang, D., & Lau, Y. (2018). Risk and cost evaluation of port adaptation measures to climate change impacts. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 444–458.

<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.004>

Zentar, R., Ouendi, F., & Wang, H. (2023). Effects of sample preparation methods on measured characteristics of marine and fluvial sediment. *International Journal of Sediment Research*.

<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2023.09.002>

## ANEXO 1. ENCUESTA