

**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
“DR. JACOBO BUCARAM ORTIZ”  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN COMO REQUISITO PREVIO  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE LA DINÁMICA  
CLIMÁTICA CON EL NIVEL DEL MAR EN LA ANTÁRTICA  
1993-2023**

**AUTORA**

**SARMIENTO TUMBACO STEFANNY NICOLE**

**TUTORA**

**OCE. ZAMBRANO ZAVALA LEILA ELIZABETH, M. Sc**

**GUAYAQUIL, ECUADOR**

**2025**

**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**“DR. JACOBO BUCARAM ORTIZ”**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**APROBACIÓN DEL TUTOR**

El suscrito, docente de la Universidad Agraria del Ecuador, en mi calidad de Tutor, certifico que el presente trabajo de titulación: ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE LA DINÁMICA CLIMÁTICA CON EL NIVEL DEL MAR EN LA ANTÁRTICA 1993-2023, realizado por la estudiante SARMIENTO TUMBACO STEFANNY NICOLE; con cédula de identidad N°0940670615 de la carrera INGENIERÍA AMBIENTAL, Unidad Académica Guayaquil, ha sido orientado y revisado durante su ejecución; y cumple con los requisitos técnicos y legales exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador; por lo tanto, se aprueba la presentación del mismo.

Atentamente,

Oce. Leila Zambrano Zavala, MSc.

Firma del Tutor

Guayaquil, 26 de marzo del 2025

**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**“DR. JACOBO BUCARAM ORTIZ”**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

Los abajo firmantes, docentes designados por el H. Consejo Directivo como miembros del Tribunal de Sustentación, aprobamos la defensa del trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE LA DINÁMICA CLIMÁTICA CON EL NIVEL DEL MAR EN LA ANTÁRTICA 1993-2023, realizado por la estudiante SARMIENTO TUMBACO STEFANNY NICOLE, el mismo que cumple con los requisitos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador.

Atentamente,

---

DRA. CARRERA MARIDUEÑA MARIELA, M.Sc.  
**PRESIDENTE**

---

ING. MOROCHO ROSERO LUIS, M.Sc.  
**EXAMINADOR PRINCIPAL**

---

ING. ORTEGA ORDOÑEZ CARLOS, M.Sc.  
**EXAMINADOR PRINCIPAL**

---

OCE. ZAMBRANO ZAVALA LEILA, M.Sc.  
**EXAMINADOR SUPLENTE**

Guayaquil, 26 de marzo del 2025

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación es dedicado a mis padres el Ing. Franco Sarmiento y la Ing. Diana Tumbaco, por ser mi principal motor de cada día, específicamente por cada esfuerzo que han realizado por sus 4 hijas. Además de ser una fuente de inspiración, perseverancia, amor y responsabilidad.

Asimismo, a cada una de mis hermanas Janny, Dayana y Paula, por motivarme a través de nuestros lazos de hermandad, dar lo mejor de mí en el transcurso de mi carrera universitaria. Además de ser mi refugio y por la alegría que me transmiten tanto en los buenos como en los malos momentos que se me han presentado en el transcurso de la vida.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, me encuentro eternamente agradecida con Dios y la Virgen María por la maravillosa familia que tengo y por cada una de sus bendiciones recibidas. Además de ser luz en mis tiempos de tempestad.

De igual manera, agradezco a mis padres el Ing. Franco Sarmiento y la Ing. Diana Tumbaco, por cada una de sus enseñanzas y apoyo incondicional lleno de un gran cariño fraternal a lo largo de mi vida estudiantil.

Además, doy las gracias a mis hermanas que las amo con todo mi ser y a mis abuelos por cada aliento de motivación.

Por otro lado, expreso mi gratitud al Ing. Diego Arcos, M.Sc. por ser una excelente persona y amigo, al igual que al Ing. Tomás Hernández, Ing. Carlos Ortega e Ing. Juan Carlos Guevara por ser parte de mi formación académica y cada uno de sus valiosos consejos.

A su vez, a mi tutora de tesis la Oce. Leila Zambrano, M.Sc., por cada uno de sus aportes de conocimiento. Por último, agradezco también al Ing. Diego Muñoz, M.Sc. por ser ese angelito que en vida me dejó muchas enseñanzas.

Finalmente, a mi mejor amigo Jean Haro por siempre apoyarme incondicionalmente y a su vez, brindarme una amistad tan leal y reconfortable. Al igual que mi mejor amiga Melany Macías por tenerme siempre presente con una llamada o mensaje de apoyo. De forma similar, a las amistades valiosas que me brindó la universidad que dejan en mí una gran experiencia universitaria.

### **Autorización de Autoría Intelectual**

Yo STEFANNY NICOLE SARMIENTO TUMBACO, en calidad de autor(a) del proyecto realizado, sobre “ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE LA DINÁMICA CLIMÁTICA CON EL NIVEL DEL MAR EN LA ANTÁRTICA 1993-2023, realizado por la estudiante SARMIENTO TUMBACO STEFANNY NICOLE” para optar el título de INGENIERA AMBIENTAL, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor(a) me correspondan, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8; 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Guayaquil, 26 de marzo del 2025

Firma

SARMIENTO TUMBACO STEFANNY NICOLE

**CI. 0940670615**

## RESUMEN

Actualmente, la variabilidad climática de la Antártida incide en la dinámica climática y circulación oceánica a escala global. A raíz de eso, este estudio analizó la tendencia del nivel medio del mar de la Ensenada Guayaquil Antártica de 1993 a 2023, a partir del procesamiento de rásters y extracción tanto de datos atmosféricos y oceanográficos. Para medir el grado de asociación entre los parámetros evaluados (precipitación, temperatura del aire, presión atmosférica, dirección/velocidad del viento, humedad relativa, temperatura superficial del mar y salinidad) con relación al nivel del mar, se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple por temporadas verano e invierno, el cual indicó un margen de error del 0.74 (aceptable). Además, se obtuvo como resultado a través de la transformada de Fourier que el nivel del mar presenta variaciones periódicas cíclicas cada 1.2, 2 y 6 meses, lo que coincide con las estaciones del año y su comportamiento. Por otra parte, las variables que mantienen mayor correlación con el nivel del mar durante el verano es la precipitación (-0.33) y humedad relativa (-0.19), debido a las alteraciones de los patrones de viento, conllevando a una ligera disminución de la altitud negativa del nivel del mar. Sin embargo, durante el invierno la TSM (0.22), salinidad (-0.21) y humedad relativa (-0.20), contribuyen a la expansión térmica del océano a nivel mundial. Finalmente, se desarrolló una aplicación de sistema de alerta temprana en base a los datos históricos obtenidos con la finalidad de proponer medidas preventivas ante posibles desastres naturales a futuro.

***Palabras claves:*** desastres naturales, expansión térmica, franjas costeras sistema de alerta temprana, variabilidad climática.

## ABSTRACT

Nowadays, climate variability Antarctic influences climate dynamics and ocean circulation globally. As a result, this study analyzed the trend of the mean sea level in the Antartica Ensenada Guayaquil from 1993 to 2023, based on rasters processing and the extraction of both atmospheric and oceanographic data. To measure the degree of association between the evaluated parameters (precipitation, air temperature, atmospheric pressure, wind direction/speed, relative humidity, sea surface temperature, and salinity) in relation to sea level, a multiple linear regression model was applied for summer and winter seasons, which indicated a margin of error of 0.74 (acceptable). Furthermore, the Fourier transform showed that sea level exhibits periodic cyclical variations every 1.2, 2 and 6 months, which coincides with the behavior of the seasons. On the other hand, the variables that maintain a greater with sea level during the summer are precipitation (-0.33) and relative humidity (-0.19), due to alterations in wind patterns, leading to a slight decrease in the negative altitude of sea level. However, during the winter the SST (0.22), salinity (-0.21) and relative humidity (-0.20), contributing to the thermal expansion of the ocean on a global scale. Finally, an early warning system application was developed based on the obtained historical data with the purpose of proposing preventive measures against potential future natural disasters.

**Keywords:** *climate variability, coastal strips, early warning system, natural disasters, thermal expansion.*



## ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes del problema.....	1
1.2 Planteamiento y formulación del problema .....	3
1.2.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2.2 Formulación del problema .....	5
1.3 Justificación de la investigación .....	5
1.4 Delimitación de la investigación .....	6
1.5 Objetivo general .....	7
1.6 Objetivos específicos .....	7
1.7 Hipótesis .....	8
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>9</b>
2.1 Estado del arte .....	9
2.2 Bases científicas .....	16
2.2.1 Parámetros Climáticos .....	16
2.2.1.1. Temperatura del Mar (TSM).....	16
2.2.1.1.1. Capa superficial o epilimnion.....	16
2.2.1.1.2. Capa de transición o metalimnion. ....	17
2.2.1.1.3. Capa profunda o hipolimnion.....	17
2.2.1.2. Tipos de satélites. ....	17
2.2.1.2.1. Satélites polares.....	17
2.2.1.2.2. Satélites geoestacionarios.....	19
2.2.1.2.3. Satélites de comunicación.....	20
2.2.1.3. Nivel del mar (SL). ....	21
2.2.1.3.1. Nivel instantáneo/ medio. ....	21
2.2.1.3.2. Geoide y nivel del mar.....	21
2.2.1.3.3. Superficie topográfica del mar.....	21
2.2.1.4. Altimetría satelital.....	23
2.2.1.4.1. Topex/Poseidón. ....	23
2.2.1.4.2. Jason-1.....	24
2.2.1.4.3. Jason-2.....	24
2.2.1.4.4. Jason-3.....	25
2.2.2 Variabilidad climática.....	26
2.2.2.1. Expansión térmica (Efecto termoestérico). ....	26

2.2.2.1. Evento El Niño y Ondas Kelvin. ....	26
2.2.2.2. Ondas de Rossby. ....	26
2.2.2.3. Intercambio de calor entre océano y atmósfera. ....	27
2.2.2.3.1. Albedo y gases de efecto invernadero. ....	27
2.2.2.3.2. Corrientes oceánicas y vientos atmosféricos. ....	27
2.2.2.3.3. Transporte de Ekman. ....	28
2.2.2.3.4. Flujos de interacción océano-atmósfera. ....	28
2.2.2.5. Pérdida de masa de los mantos de hielo y glaciares. ....	29
2.2.2.6. Variación baristática. ....	29
2.2.2.7. Aguas superficiales, sumergidas y permafrost. ....	29
2.2.2.7.1. Aguas superficiales. ....	29
2.2.2.7.2. Aguas sumergidas o subterráneas. ....	30
2.2.2.8.2. Permafrost. ....	30
2.2.2.8. Cambios del nivel del mar. ....	30
2.2.2.8.1. Eutasia/ Cambios Eustásicos. ....	30
2.2.2.8.2. Cuencas oceánicas. ....	31
2.2.2.8.3. Circulación oceánica y mareas. ....	31
2.2.3 Sistema de alerta temprana para amenazas que enfrenta la variabilidad climática en el nivel del mar. ....	32
2.2.3.1. Sistema de alerta temprana. ....	32
2.2.3.2. Componentes de un SAT. ....	33
2.2.3.2.1. Conocimiento previo e identificación del riesgo. ....	33
2.2.3.2.2. Servicio de seguimiento y alerta. ....	33
2.2.3.2.3. Difusión y comunicación. ....	34
2.2.3.2.4. Capacidad de respuesta. ....	34
2.2.3.3. Factores de Riesgo. ....	34
2.2.3.3.1. El Niño-Oscilación (ENOS). ....	34
2.2.3.3.2. Inundación. ....	35
2.2.3.3.3. Erosión. ....	35
2.2.3.3.4. Salinización. ....	35
2.2.3.3.5. Ciclones Tropicales. ....	36
2.3 Marco legal. ....	36
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS. ....</b>	<b>59</b>
3.1 Enfoque de la investigación. ....	59

3.1.1 Tipo y alcance de investigación.....	59
3.1.2 Diseño de investigación .....	59
3.2 Metodología.....	59
3.2.1 Variables .....	59
3.2.1.1. Variable independiente. ....	59
3.2.1.2. Variable dependiente. ....	59
3.2.2. Matriz de operacionalización de variables.....	60
3.2.3. Recolección de datos .....	61
3.2.3.1. Recursos.....	61
3.2.3.2. Métodos y técnicas. ....	61
3.2.3.2.1. Georreferenciación del área de estudio. ....	61
3.2.3.2.2. Recopilación de datos satelitales. ....	62
3.2.3.2.3. Procesamiento de imágenes satelitales .....	62
3.2.3.2.4. Diseño del sistema de alerta temprana. ....	63
3.2.4 Análisis estadístico.....	65
3.2.4.1. Estadística inferencial. ....	65
3.2.4.1.1. Matriz de correlación. ....	65
3.2.4.1.2. Modelo de regresión lineal múltiple. ....	66
3.2.4.2. Análisis de series temporales. ....	66
3.2.4.2.1. Transformada de Fourier.....	66
3.2.4.3. Análisis espacial. ....	67
3.2.4.3.1. Red neuronal (Machine learning). ....	67
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>68</b>
4.1 Compilación de imágenes satelitales del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) respecto a la TSM, MSL, SSS, SSW y del Centro de Servicios de Información y Datos de Ciencias de la Tierra Goddard (DISCO GES) en cuanto a la precipitación, temperatura del aire, humedad y presión atmosférica de la Ensenada Guayaquil Antártica.....	68
4.1.1 Variables Atmosféricas.....	68
4.1.1.1. Precipitación. ....	68
4.1.1.2. Temperatura del aire.....	68
4.1.1.3. Presión atmosférica. ....	69
4.1.1.4. Velocidad y dirección del viento.....	69
4.1.1.5. Humedad relativa.....	69

4.1.2 Variables oceanográficas .....	70
4.1.2.1. Temperatura superficial del mar. ....	70
4.1.2.2. Salinidad. ....	70
4.1.2.3. Nivel del mar. ....	71
4.2 Aplicación de una matriz de correlación de múltiples variables para evaluar la relación entre las series temporales de variables climáticas y oceánicas con los cambios en el nivel del mar. ....	72
4.2.1 Modelo de regresión lineal múltiple .....	72
4.2.1.1. Análisis de correlación entre las variables atmosféricas y oceanográficas que forman el modelo. ....	72
4.2.1.1.1. Multicolinealidad. ....	74
4.2.1.1.2. Generación del modelo. ....	75
4.2.1.1.3. Akaike Information Criterion (AIC). ....	76
4.2.1.1.4. Segmentación de mapas de calor por temporada. ....	78
4.2.1.1.5. Verano Antártico. ....	80
4.2.1.1.6. Invierno Antártico. ....	81
4.2.2 Transformada de Fourier .....	83
4.2.2.1. Descomposición de la serie temporal. ....	83
4.2.2.2. Red neuronal (Machine learning) .....	88
4.2.2.2.1. Árbol de decisión .....	88
4.3 Diseño de un sistema de alerta temprana ante posibles aumentos significativos del nivel del mar. ....	88
4.3.1 Modelo conceptual para la implementación del sistema de alerta temprana (SAT) .....	88
4.3.1.1. Componente científico. ....	89
4.3.1.2. Componente tecnológico. ....	89
4.3.1.2.1. Propósito del SAT. ....	89
4.3.1.3. Componente social .....	90
4.3.2 SAT Ensenada Guayaquil, Antártica .....	90
4.3.2.1. Descripción general. ....	90
4.3.2.1.1. Enfoque de la aplicación. ....	90
4.3.2.1.2. Funciones. ....	91
4.3.2.1.3. Características del usuario. ....	92
4.3.2.2. Restricciones generales. ....	92

4.3.2.2.1. Políticas reguladoras.....	92
4.3.2.2.2. Requisitos del lenguaje.....	92
4.3.2.3. Sistema de alerta temprana.....	92
4.3.2.3.1. Interfaz de usuario.....	92
4.3.2.3.2. Interfaz de página principal.....	93
4.3.2.3.3. Interfaz del menú principal de la aplicación.....	94
4.3.2.3.4. Interfaz de la pestaña “Variables atmosféricas”.....	95
4.3.2.3.5. Interfaz de la pestaña “Variables oceanográficas”.....	96
4.3.2.3.6. Interfaz de la pestaña “Medidas de prevención”.....	97
4.3.2.3.7. Interfaz de la pestaña “Comunidad”.....	97
<b>5. DISCUSIÓN.....</b>	<b>99</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>102</b>
6.1 Conclusiones.....	102
6.2 Recomendaciones.....	103
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>113</b>
<b>APÉNDICE.....</b>	<b>248</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación de la zona de estudio.....	7
Figura 2. Diagrama de métodos y técnicas para evaluar las variables de estudio	61
Figura 3. Etapas de procesamiento de imágenes satelitales .....	63
Figura 4. Fases de intervención en la primera etapa del SAT .....	63
Figura 5. Fases de intervención en la tercera etapa del SAT .....	64
Figura 6. Matriz de correlación entre las variables atmosféricas y oceanográfica	72
Figura 7. Diagrama de dispersión entre la temperatura del aire y temperatura superficial del mar .....	74
Figura 8. Mapa de calor de la matriz de correlación.....	75
Figura 9. Variación del nivel del mar en verano .....	79
Figura 10. Variación del nivel del mar en invierno.....	79
Figura 11. Correlograma de verano Antártico .....	81
Figura 12. Correlograma de invierno Antártico.....	83
Figura 13. Serie temporal del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica .....	83
Figura 14. Componente de tendencia del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica	84
Figura 15. Componente estacional del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica ...	85
Figura 16. Componente aleatoria del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica .....	85
Figura 17. Serie centrada del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica .....	86
Figura 18. Espectro de frecuencias del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica ..	87
Figura 19. Espectro completo del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica .....	87
Figura 20. Modelo conceptual del SAT .....	88
Figura 21. Diseño del logo del SAT .....	91
Figura 22. Interfaz de usuario.....	93
Figura 23. Interfaz de la página principal .....	94
Figura 24. Interfaz del menú principal .....	95
Figura 25. Variables atmosféricas .....	96
Figura 26. Variables oceanográficas .....	96
Figura 27. Medidas de prevención .....	97
Figura 28. Comunidad .....	98
Figura 29. Estructura vertical del océano .....	113
Figura 30. Satélite NOAA19 .....	113
Figura 31. Instrumentos de la serie GOES-R.....	114
Figura 32. Topex/Poseidon .....	114

Figura 33. Partes del satélite Jason-1 .....	115
Figura 34. Partes del satélite Jason-2 .....	115
Figura 35. Partes del satélite Jason-3 .....	116
Figura 36. Desarrollo de una onda Kelvin cerca de la costa de Sudamérica .....	116
Figura 37. Ondas de Rossby .....	117
Figura 38. Principales procesos que controlan el balance energético global medio anual en la Tierra .....	117
Figura 39. Variaciones estacionales en las estructuras térmicas y la circulación de un lago glacial .....	118
Figura 40. Transporte de Ekman en una surgencia costera (arriba) y hundimiento (abajo) en el hemisferio norte .....	118
Figura 41. El calor del océano amenaza las plataformas de hielo .....	119
Figura 42. Cambios del nivel del mar de carácter global .....	119
Figura 43. Proceso de circulación oceánica .....	120
Figura 44. Esquema de las mareas .....	120
Figura 45. Elementos de un sistema de alerta temprana eficaz según la WMO.	121
Figura 46. Recursos, herramientas y materiales .....	122
Figura 47. Árbol de decisiones .....	248

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Variables independientes .....	60
Tabla 2. Variables dependientes .....	60
Tabla 3. Datos a utilizar en el estudio .....	62
Tabla 4. Coeficientes de correlación .....	65
Tabla 5. Inspección del modelo inicial de regresión .....	76
Tabla 6. Inspección del mejor modelo de regresión .....	77
Tabla 7. Predicciones del nivel del mar .....	78
Tabla 8. Estado operativo del POES .....	121
Tabla 9. Coordenadas geográficas del área de estudio .....	122
Tabla 10. Precipitación mensual desde 1993 – 2023 .....	123
Tabla 11. Temperatura del aire mensual desde 1993 – 2023 .....	138
Tabla 12. Presión atmosférica mensual desde 1993 – 2023 .....	154
Tabla 13. Velocidad y dirección del viento mensual desde 1993 – 2023 .....	169
Tabla 14. Humedad relativa mensual desde 1993 – 2023 .....	185
Tabla 15. Temperatura superficial del mar mensual desde 1993 – 2023 .....	201
Tabla 16. Salinidad mensual desde 1993 – 2023 .....	216
Tabla 17. Nivel del mar mensual desde 1993 – 2023 .....	232



**ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo N° 1: Figuras de Marco Teórico .....	113
Anexo N° 2: Tablas de Marco Teórico.....	121
Anexo N° 3: Tablas de Materiales y Métodos .....	122
Anexo N° 4: Figuras de Materiales y Métodos .....	122
Anexo N° 5: Mapas mensuales de las variables atmosféricas 1993 – 2023 .....	123
Anexo N° 6: Mapas mensuales de las variables oceanográficas 1993 – 2023 ..	201

## ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice N° 1: Aplicación del Marching Learning.....	248
--	-----

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes del problema

En los últimos años, se ha considerado fundamental comprender la variabilidad climática, en vista de que son cambios anormales en el clima producidos por el aumento de gases de efecto invernadero. Uno de sus efectos es el aumento del nivel del mar, causado por el derretimiento de glaciares y mantos de hielo debido a altas temperaturas. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC] (2019) en su sexto informe sobre el océano y la criósfera en un clima cambiante proyecta que la tasa promedio mundial del aumento del nivel del mar se estima que llegue a 15 mm/año, ya que para el año 2100 podría superar varios centímetros por año en el siglo XXII, como resultado de las variaciones de la dinámica del hielo. Por otra parte, las reconstrucciones del nivel del mar del siglo XX y los datos de altimetría satelital como Topex Poseidón y Jason 1-2-3, muestran que la tasa de aumento del nivel del mar ha aumentado decenas de milímetros aproximadamente 1.7 mm/año, sin embargo, desde 1993 en ciertas regiones se ha observado un aumento en la tasa de al menos 3 mm/año, superando cualquier otro período del siglo XX (Church et al., 2010).

En lo que respecta a la Antártida, reconocida como el quinto continente más extenso y notable por su singularidad, alberga cerca del 90% del agua dulce planeta y está mayormente cubierta por hielo en un 98%, con una superficie rocosa subyacente de aproximadamente 7 millones de km<sup>2</sup>. Aunque su diámetro es de 4 500 y ocupa un área de 13.6 millones de km<sup>2</sup>, está rodeado por el Océano Glacial Antártico, cuya extensión congelada varía entre 2.65 y 18.8 millones de km<sup>2</sup> durante el verano y el invierno austral (Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada [INOCAR], 2016). Evidentemente cada año se producen deshielos de aproximadamente 1 450 km<sup>3</sup>, esto tiene un impacto adverso en las modificaciones volumétricas de las aguas oceánicas. De hecho, Estrada (2013) en uno de sus estudios científicos internacionales afirma que la Antártida tiene un impacto significativo en el clima a nivel global, más allá de su conexión geográfica con países cercanos a las zonas polares. Las aguas profundas del Atlántico Norte y la Antártida son los componentes principales de la llamada “cinta transportadora termohalina”, que suministra oxígeno al océano y regula la temperatura de la tierra.

En cuanto a la plataforma de hielo Filchner-Ronne conocida como la segunda más grande de la Antártida se encuentra protegida por agua

extremadamente fría y salada, evitando la entrada de agua cálida y derretimiento desde abajo; sin embargo, según simulaciones realizadas por oceanógrafos del AWI, los cambios de temperatura en la Antártida podrían repercutir en el desprendimiento de icebergs que pertenecen a los márgenes costeros asumiendo graves consecuencias sociales, ambientales y económicas a nivel mundial, teniendo en cuenta que millones de habitantes y varias infraestructuras se encuentran ubicadas en zonas costeras (Grote et al., 2018). Por lo tanto, es de vital importancia que se lleven a cabo investigaciones que empleen nuevas tecnologías y en los buques se utilicen equipos sofisticados que permitan prever con precisión el comportamiento del nivel del mar.

Cabe considerar que los datos recopilados a través de la serie del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), emplea uno de los sensores operativos en la actualidad denominado Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), instalado en los satélites NOAA-12 y NOAA-14 (Cerdeira et al., 2000). Este sensor suministra información sobre la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en formato de imágenes de alta resolución transmitidas (HRPT). Recientes investigaciones han revelado que los eventos de El Niño en el Pacífico tropical causan condiciones frías y secas en la Península Antártica. Además, provocan temperaturas más altas y mayores precipitaciones en la región costera sur del Mar de Amundsen, frente a la Antártida Occidental.

Las fluctuaciones climáticas en el Pacífico ecuatorial muestran un patrón asociado con el movimiento del agua dentro de los océanos en respuesta a la variabilidad del viento vinculados a eventos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur, los cuales se reflejan en gran medida en la distribución térmica oceánica regional (Palacios et al., 2017). Generalmente, las temperaturas de la superficie del mar en la costa occidental de América del Sur oscilan entre 15 °C y 20 °C, con temperaturas superiores a 25 °C ocurriendo en la llamada “cuenca de aguas cálidas” ubicada en el Océano Pacífico Central y Occidental (Hernández, 2002).

Adicionalmente, el fenómeno de El Niño que va de este a oeste en el Océano Pacífico central provoca pendientes positivas y negativas del orden de 0.3 m, y cambios decenales en la velocidad de rotación de la Tierra (Eustasia rotacional), que potencialmente pueden redistribuir masas de océano aguas, levantándolas u ocasionando una caída del nivel del mar regional en órdenes de magnitud de 1.0 a 0.1 m, esto es lo que sucede durante los “Eventos super-ENSO” (Zazo, 2006). Al

mismo tiempo la corriente de Humboldt se halla confinada a una estrecha corriente en chorro que fluye hacia el norte impulsada por la dinámica estacional de Sverdrup, la cual permite el transporte de agua fría desde las regiones subantárticas hacia el norte a lo largo del límite oriental del giro subtropical del Pacífico Sur, lo que contribuye significativamente al transporte meridional de calor y agua dulce, afectando a la distribución de la TSM en la región (Fuenzalida et al., 2008).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, es necesario destacar la relevancia de estudiar los cambios en el nivel del mar conocido como “Eustasia” en relación a la temperatura superficial del mar en el sistema climático antártico, ya que estos cambios estéricos al irse incrementando producen una sensibilidad en las masas de hielo provocando su pérdida de hielo en los glaciares conllevando a un ascenso del nivel del mar. Por ello, el presente estudio tendrá como finalidad analizar la evolución de las variables atmosféricas y oceanográfica durante un lapso de 30 años, utilizando información satelital para el cálculo de campos mensuales promedios de dichas variables en relación nivel del mar en la Ensenada Guayaquil, Antártida para así proporcionar información relevante que permitirá prevenir desastres naturales a futuro.

## **1.2 Planteamiento y formulación del problema**

### **1.2.1 Planteamiento del problema**

En lo que respecta a los cambios en las tendencias de temperatura de superficie del mar, se han observado como efecto el retroceso de glaciares, alteración de los frágiles patrones biológicos y en el derretimiento de los casquetes polares, los cuales conllevan a la elevación del nivel del mar repercutiendo en graves consecuencias a nivel mundial. Es importante mencionar que el aumento del nivel del mar depende de muchos factores entre los principales la concentración de gases de efecto invernadero y temperaturas de la atmósfera, por ende, actualmente se ha convertido en una preocupación creciente a nivel global, con implicaciones significativas para las comunidades costeras, los ecosistemas marinos y la infraestructura construida en aquellas zonas costeras.

Por otra parte, en lo que respecta a la Antártica que es uno de los continentes más perjudicados en cuanto a la evolución climática y al ser una de las regiones menos exploradas del planeta; cabe recordar que los océanos son grandes

sumideros naturales de CO<sub>2</sub> del planeta. Según Fraser et al. (2020) la Antártica es uno de los mayores almacenes de calor y carbono; éste concentra no solo cerca del 35% de la absorción global del exceso de carbono de la atmósfera, sino también cerca del 75% de la absorción oceánica del exceso de calor; teniendo en cuenta que el principal sumidero de calor en el hemisferio sur es la Antártida y océano circundante. El 80% de calor se transporta a través de la atmósfera y el 20% por el océano. La Corriente Circumpolar Antártica (ACC), que es más grande que la Corriente del Golfo, limita la transferencia de calor a través del océano hacia el polo, lo que resulta crucial para conservar el frío en el continente antártico.

Los eventos climáticos extremos, como las olas de calor marinas, los episodios extremos de El Niño-Oscilación Austral y los ciclones tropicales, están siendo afectados por la modificación climática, la cual afecta a las masas de agua y repercute en graves consecuencias para la naturaleza y la sociedad. Según el INOCAR (2016), las corrientes frías antárticas están conectadas con las principales aguas cálidas del resto de los océanos, cumpliendo un papel crucial en la dinámica climática y el balance de los océanos. Las aguas cálidas y profundas del Atlántico Norte que se desplazan hacia el sur a profundidades de 2 000 a 3 000 m son contrarrestadas por el flujo hacia el norte de aguas frías del régimen subantártico en la superficie (aguas del régimen subantártico), a profundidades intermedias (aguas intermedias antárticas) y en el fondo (aguas antárticas de fondo). Estas corrientes profundas del Atlántico Norte y de la Antártida son elementos clave del llamado “transportador termohalino”, que desempeña un papel crucial en la oxigenación del océano y en regulación de la temperatura global.

A pesar de las investigaciones realizadas, a nivel nacional e internacional existe disponibilidad de información limitada en base a la correlación de la temperatura superficial del mar y nivel medio del mar. Sin embargo, el comité científico internacional (SCAR-Scientific Committee on Antarctic Research) ha actualizado recientemente su programa de investigación científica en la Antártida, orientándolo hacia el estudio de la variabilidad climática y su efecto en el cambio del nivel medio del mar; con la finalidad de establecer programas de investigación abiertos a la participación de estudiantes y profesionales interesados en examinar el sistema climático de la región Antártica.

### **1.2.2 Formulación del problema**

¿Es posible que la dinámica climática ejerza influencia en la elevación del nivel del mar en la Ensenada Guayaquil, Antártica?

### **1.3 Justificación de la investigación**

La Ensenada de Guayaquil de la Antártida es el acceso principal de la Estación Científica Pedro Vicente Maldonado del Ecuador, la cual mantiene condiciones hidrográficas apropiadas para permitir la aproximación y el fondeo de buques más pequeños para brindar apoyo logístico a la estación (Horn y Arellano, 1990). En esta zona de estudio, así como en todo el continente Antártico, fluye la corriente Circumpolar Antártica en dirección al este, exhibiendo variaciones influenciadas por las características geográficas del área y la topografía del lecho marino.

Con respecto a la Temperatura Superficial del Mar (TSM), la comunidad científica ha mostrado preocupación por la posibilidad de que exista un mayor aumento en las masas de agua debido a su influencia climática y oceanográfica. Puesto que, la temperatura se ve influenciada por el intercambio de calor entre la atmósfera y la capa superficial del océano. Sus variaciones tienen un impacto significativo en las proyecciones climáticas, formación de huracanes y, por supuesto en el clima a nivel regional y global (Álvarez y Ruiz, 2021). Por ello, es fundamental reducir el cambio climático con la finalidad de evitar efectos más grandes del aumento del nivel del mar en todo el mundo, especialmente si continúa la expansión térmica del océano o el deshielo parcial de los casquetes polares en la Antártida.

Es impactante el ritmo al que se ha observado que aumenta el nivel del mar, simultáneamente al incremento de fenómenos meteorológicos adversos y expansión urbana en zonas costeras, lo cual ha provocado que dichas áreas sean mayormente susceptibles a inundaciones. Lo mismo ocurre en los ecosistemas y biodiversidad marina, dado que, al modificar la distribución de temperatura y nutrientes, podría ocasionar un impacto directo en organismos y ambientes marinos. Por lo tanto, provocaría alteraciones en las capas superiores del océano, producción marina, y en última instancia, la red trófica marina, que comprende recursos claves como peces, moluscos y crustáceos. Los cambios en la disposición de estructuras de mesoescala pueden influir en la supervivencia de las etapas larvianas de varias especies, lo que conduce a modificaciones en las poblaciones de especies comerciales (Anadón et al., 2005).

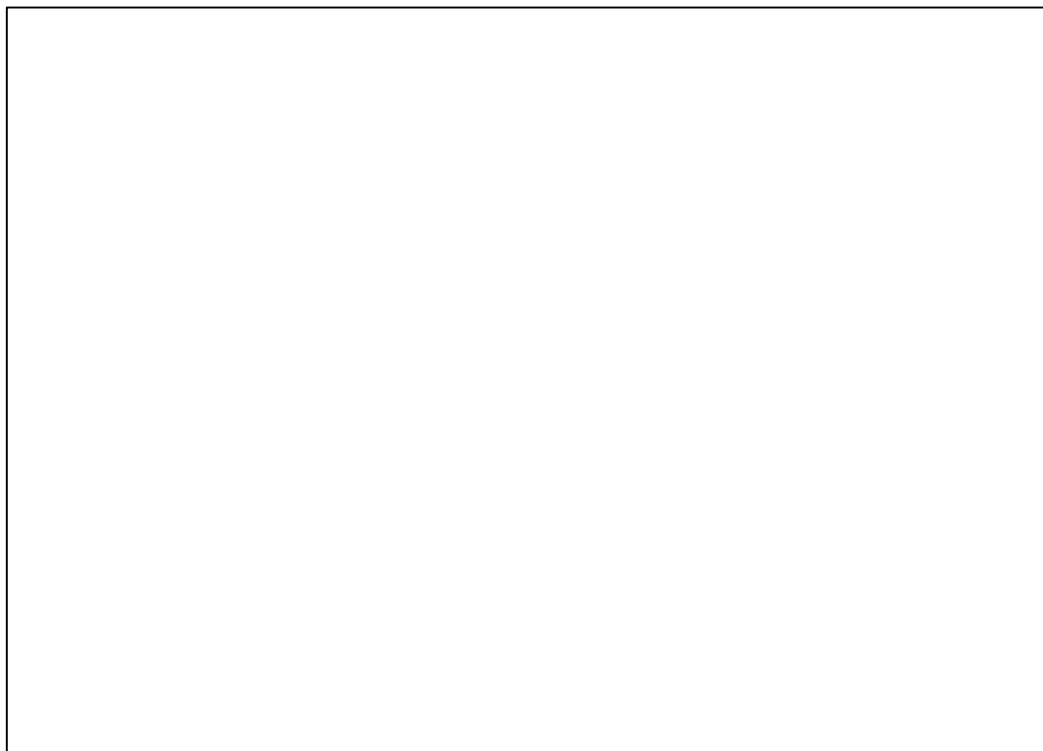
En la actualidad, resulta crucial contribuir a la investigación científica sobre la variabilidad climática oceánica Antártida y su influencia en el nivel del mar. Esto garantizaría la obtención de datos más precisos y actualizados, con una cobertura espacial y temporal más completa, para utilizar en modelos matemáticos y proyecciones futuras. Estos avances posibilitarían el desarrollo de estrategias globales de adaptación y mitigación más efectivas a nivel global, no solo para comunidades costeras vulnerables, sino también para sectores como la navegación marítima y la gestión de recursos marinos. En última instancia, estos tipos de investigaciones servirían como base sólida para la toma de decisiones informadas en políticas ambientales y planes de acción climática a nivel internacional.

Finalmente, el presente proyecto estudió la dinámica climática del océano y su impacto en el nivel del mar en uno de los puertos de la Antártica llamado “Ensenada de Guayaquil”. Se realizará un análisis de datos mensuales de altimetría satelital desde 1993 hasta el 2023, con el fin de proporcionar información relevante para prevenir futuros desastres naturales. Sin embargo, es crucial contar con la colaboración de toda la sociedad para desarrollar enfoques innovadores de adaptación a la variabilidad climática y proporcionar diversas herramientas de apoyo a los sectores más afectados.

#### **1.4 Delimitación de la investigación**

- **Espacio:** El presente trabajo de investigación se efectuó en la “Ensenada de Guayaquil”, que se encuentra ubicada al noreste de la Isla Greenwich con las siguientes coordenadas UTM 358943 E y 3073632 N (**Figura 1**).



**Figura 1.*****Delimitación de la zona de estudio***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

- **Tiempo:** La investigación se llevó a cabo durante cinco meses.
- **Población:** No existen beneficiarios directos, sin embargo, cada cierto tiempo miembros del equipo de investigación del Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador, realizan expediciones en el área bajo estudio.

**1.5 Objetivo general**

Analizar la relación dinámica del clima con el nivel del mar utilizando imágenes satelitales para la identificación de la correlación entre las variables climáticas y oceánicas durante el período 1993 - 2023 en la Ensenada Guayaquil Antártica.

**1.6 Objetivos específicos**

- Compilar imágenes satelitales del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) respecto a la TSM, MSL, SSS, SSW y del Centro de Servicios de Información y Datos de Ciencias de la Tierra Goddard (DISCO GES) en cuanto a la precipitación, temperatura del aire, humedad y presión atmosférica de la Ensenada Guayaquil Antártica.

- Aplicar una matriz de correlación de múltiples variables para evaluar la relación entre las series temporales de variables climáticas y oceánicas con los cambios en el nivel del mar.
- Diseñar un sistema de alerta temprana ante posibles aumentos significativos del nivel del mar.

### **1.7 Hipótesis**

La variabilidad climática y oceánica muestran una correlación tanto positiva como negativa en el rango de  $|-0.7 < -1|$  en la elevación del nivel de mar de la Ensenada Guayaquil, Antártica, durante el período de estudio 1993 – 2023.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Estado del arte

Zambrano y Cardin (1989) en el verano austral de 1988, llevaron a cabo un estudio detallado del estrecho de Bransfield y se establecieron un total de 23 estaciones marinas para obtener información desde el nivel del mar hasta los 500 m., al igual que la adquisición de datos de profundidad, temperatura y salinidad. En este trabajo se describieron las condiciones del mar predominantes durante el período de muestreo y se determinó la estructura termohalina del estrecho, mediante diagramas T-S, en el área de la masa de agua. Del análisis dinámico del terreno se concluyó que la dirección de circulación es NE y la situación general es similar a la observada en la campaña FIBEX de 1981, su temperatura fue mayor en el orden de 0.4 °C y la salinidad superficialmente indicó valores superiores a 0.5 en varias zonas.

En base al análisis comparativo de la temperatura superficial del mar detectada vía satélite y por mediciones in situ al Norte de Cuba y Noreste de la Península de Yucatán, se emplearon técnicas de teledetección para analizar la superficie del mar en las áreas de estudio mencionadas anteriormente. Para ello, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos mediante el procesamiento de imágenes satelitales y mediciones realizadas in situ. Los valores TSM de cruceros y satélites difieren en promedio entre 0.2 y 0.3 °C (Cerdeira et al., 2000).

Zazo (2006) indica que se hallaron variaciones en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en los interglaciares más antiguos y actual, al igual que la temperatura superficial del mar. En cuanto a las tres estaciones de monitoreo, las tendencias señalan una subida del nivel del mar de 2.12 mm/año en Santander, 2.51 mm/año en Coruña y 2.91 mm/año en Vigo durante el período 1943-2000; considerando que el aumento de calor en el océano ha sido considerado como el mayor responsable de la subida del nivel del mar, dada la relación indirecta que mantiene la temperatura media en el Atlántico Norte, debido a que los interglaciares son los que han demostrado cambios abruptos causados por cambios en la insolación, procesos atmosféricos y oceánicos.

Fuenzalida et al. (2008) llevaron a cabo un procesamiento de datos de temperatura superficial del mar (TSM) in situ y satelital, junto con datos del nivel medio del mar (MSLA) obtenidos por altimetría satelital. No obstante, calcularon

anomalías del MSLA en relación con una media de siete años (1993-1999), y a la vez, estas anomalías se fusionaron con la topografía dinámica media mundial (CMDT) para la obtención de climatologías estacionales de la circulación superficial del este del Océano Pacífico Sur, con énfasis en la corriente de Humboldt. Los datos de TSM in situ y satelital, combinados con las anomalías del nivel medio del mar, permitieron analizar la variabilidad de la circulación oceánica y revelar la dinámica similar a un chorro de la corriente de Humboldt.

La determinación de las tasas relativas de variación del nivel medio del mar, nos permite afirmar que todo el litoral Andaluz se verá afectado en mayor o menor medida por la subida de las masas de agua, provocando una intensificación de los procesos erosivos en las costas, zonas pantanosas, desembocaduras de ríos y una gran desviación de cauces fluviales. Los resultados obtenidos muestran una ampliación del espacio inevitable en las zonas de Cádiz y Málaga, en parte gracias al método utilizado, que combina la tasa relativa de cambio del nivel medio del mar con la especialización de los peligros, introduciendo así un riesgo muy elevado. Además, se notaron pequeñas fluctuaciones en el nivel del Mediterráneo durante el Cuaternario (hasta 1.5 metros), con fluctuaciones absolutas mayores registradas en la historia geológica reciente (hace 18 000 años el nivel del Mediterráneo era 120 metros más bajo que hoy) (Fraile, 2011).

Con respecto al estudio de la variabilidad del nivel del mar en la Antártida, se determinó la amplitud de las mareas basándose en registros de mareas de 24 días, sus valores medios y sicigias fueron de 1.08 y 2.15 m, respectivamente, que corresponden a valores medios de marea. A través del software nmp2, se caracterizaron las señales de marea para obtener 24 componentes o constantes armónicas. Entre los componentes de esta serie, los más significativos en amplitud son los asociados principalmente a ciclos diurnos. Esto significa que se encuentran dentro de las estimaciones científicas de la tasa promedio de aumento del nivel del mar (2.5 mm por año). Estas suposiciones no son irreales, por lo que se pronostica un aumento de la temperatura de 2.5 °C durante los próximos 80 años como resultado del calentamiento global. Del mismo modo, el nivel del mar aumentará entre 0.10 y 0.88 m, pero una gama tan amplia de proyecciones muestra claramente las incógnitas que existen en la comunidad científica internacional, principalmente debido a la falta de información estandarizada y a los fenómenos climáticos, por ejemplo, El Niño elevando temporalmente el nivel del mar (en el caso de Perú, "El

Niño" 1997/1998 en 42 cm) y la magnitud de los efectos del derretimiento antártico y la expansión térmica del agua de mar (Estrada, 2013).

Investigaciones recientes han demostrado que el aumento global del nivel del mar se debe al impacto de la variabilidad climática. Este estudio evalúa el impacto del cambio climático en el aumento del nivel del mar a lo largo de la costa sur de Irán. Entre las diferentes variables simuladas por este modelo, se seleccionan aquellas de máxima correlación con los cambios del nivel del mar en la región de estudio y menor redundancia entre sí para predecir el aumento del nivel del mar mediante el uso de regresión por pasos. Finalmente, los resultados muestran que el aumento promedio del nivel del mar en la región de estudio es de aproximadamente 0.33 m y 0.59 m en los escenarios de fluctuaciones climáticas de A1b y A2, respectivamente (Goharnejad et al., 2013).

González, F (2013) llevo a cabo la comparación de dos métodos principales para estudiar valores extremos: el método del máximo anual y el método del valor límite máximo (POT), utilizando diferentes funciones teóricas de distribución de probabilidad basadas en datos empíricos. Por otro lado, concluyo que los fenómenos atmosféricos que contribuyen a un aumento significativo del nivel del mar pueden coincidir con flujos y reflujos de modo que el nivel total del mar no alcance valores extremos. En este sentido, filtrar el componente de marea elimina este efecto y, por lo tanto, el análisis de la altura de las olas y los residuos meteorológicos (marejadas ciclónicas) puede proporcionar correlaciones más altas. En las Islas Canarias, el aumento total del nivel del mar es generalmente de 2.0 m, lo que es suficiente para enmascarar los efectos de los residuos meteorológicos. Otro factor que puede enmascarar la dependencia entre las olas y el nivel del mar son las olas de fondo, que contribuyen al valor total de la altura de las olas, pero son independientes de los vientos locales que producen los residuos meteorológicos.

Navedas (2014) señala que es fundamental que todas las naciones puedan reconocer los peligros que enfrentan debido al fenómeno del cambio climático global. Esto facilitaría la implementación de acciones para disminuir la vulnerabilidad tanto de las personas como de la infraestructura. En esta investigación se analizan los peligros y la susceptibilidad de la costa de Venezuela ante los cambios en el nivel del mar, utilizando variables como la topografía, la calidad del suelo, la población urbana y la inversión industrial y turística, el análisis

permitió realizar una valoración territorial. Los mapas de índice multicriterio se evaluaron utilizando GIS Arc/View y Arc/Info. Los hallazgos indican que las áreas urbanas costeras son las más significativas y son especialmente vulnerables al eventual aumento del nivel del mar. A lo largo de la costa de Venezuela, el nivel del mar aumenta a un ritmo de 2 mm por año, lo que significa que se necesitan 500 años para subir 1 metro. Finalmente, los peligros del aumento del nivel del mar para Venezuela no son inminentes, y el país tiene tiempo para adaptarse a las condiciones futuras si no se aceleran estos procesos.

El reciente aumento del afloramiento de agua profunda y cálida impulsado por el viento en la región circumpolar superior se ha relacionado con el derretimiento acelerado de las plataformas de hielo y los glaciares de la Antártida occidental. Para evaluar mejor la relación a largo plazo entre el afloramiento de UCDW y la estabilidad de la capa de hielo de la Antártida Occidental, se realizó una reconstrucción multiproxy de las condiciones de las aguas superficiales y subterráneas del Holoceno en Margaret Bay, Península Antártica Occidental (WAP). A partir de 7.0 ka BP, el hielo marino aumentó y la productividad disminuyó, lo que indica un debilitamiento de la influencia de la UCDW en Margaret Bay, coincidiendo con la migración ecuatorial de los vientos del oeste en el hemisferio sur. La influencia de UCDW duró hasta mediados del Holoceno, y el hielo marino a largo plazo persistió en Margaret Sound hasta 4.2 ka BP. El derretimiento y reordenamiento periódicos del hielo marino al final del Holoceno pueden indicar la entrada de UCDW en Margaret Bay durante este período. Los cambios periódicos en la oceanografía de Margaret Bay a finales del Holoceno son consistentes con una mayor sensibilidad al forzamiento ENSO, mientras que el forzamiento SWW domina desde principios hasta mediados del Holoceno (Peck et al., 2015).

El monitoreo de la temperatura del mar tanto a nivel superficial como subsuperficial en dos estaciones ubicadas frente a la costa ecuatoriana, utilizando datos recopilados a través de un CTD (Temperatura de conductividad), revela lo fundamental que es comprender como los procesos físicos del océano influyen en las costas de Ecuador y mantienen relación con la predicción de eventos climáticos como El Niño. Se llevó a cabo un análisis descriptivo de las series de temperatura, obteniendo climatología y anomalías, al igual que las correlaciones cruzadas y análisis de densidad espectral. Se obtuvo como resultado en el periodograma una alta correlación lineal entre las anomalías de temperatura y los índices de El Niño,

destacando altas correlaciones en profundidades de 50 y 75 m, alcanzando valores alrededor de 0.7 con las regiones Niño 1+2 y Niño 3 (González y García, 2015).

Palacios et al. (2017) realizaron un estudio de 21 años utilizando imágenes satelitales durante el período 1983-2002 del Mar Caribe, en el cual tuvo como objetivo describir la variabilidad de la temperatura del mar. Las imágenes fueron extraídas del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) llevando a cabo un análisis anual, semestral, trienal y cuatrienal obteniendo como resultado series de modelos de temperatura superficial para la caracterización de la variabilidad climática en el Caribe. Las diferencias entre los modelos y series detallaron anomalías interanuales relacionadas con eventos como El Niño y La Niña.

Este artículo presenta un método para procesar datos satelitales de la UKMO para variables de temperatura de la superficie del mar (TSM), lo cual permitió a los expertos técnicos preparar adecuadamente mapas de información geoespacial y mapas de tendencias de TSM territorial y Región Insular del Ecuador. Los datos satelitales entre 2007 y 2016, demostraron que la temperatura de la superficie del mar tiene un impacto importante en el proceso de acoplamiento aire-mar y su evolución espacio-temporal con variaciones estacionales regionales, es relevante en varios campos de investigación a nivel nacional. El control de calidad de los datos en un dominio local determinado dio como resultados gráficos de interpolación y gráficos de tendencias que muestran el comportamiento medio decenal de la temperatura de la superficie del mar en la región ecuatorial, un proceso que facilita varios tipos de análisis evolutivos (Del Salto et al., 2018).

En cuanto a varias observaciones y modelos numéricos, se han realizado indagaciones acerca de las inundaciones causadas por fuertes frentes fríos en el Lago Términos, México, y cómo estas evolucionan bajo diferentes escenarios de aumento del nivel del mar. El Laboratorio de Modelado de Dinámica de Ecosistemas Marinos de la Universidad de Massachusetts Dartmouth utiliza el Modelo de Circulación Oceánica de Bajo Volumen de la Comunidad Marina (FVCOM) con forzamiento meteorológico derivado de simulaciones de alta resolución de este modelo de investigación y pronóstico del tiempo (WRF). Las simulaciones oceánicas se realizan utilizando configuraciones en las que es posible que las cámaras se inunden y se sequen. Los resultados del estudio se compararon con los resultados de simulaciones numéricas. Un potente evento boreal inundó

una superficie de 940 kilómetros cuadrados actualmente cubierta por manglares al nivel actual del mar. Esto muestra que la región norte es crítica para el riego de grandes áreas de manglares, puesto que en bajos escenarios de aumento del nivel del mar de 0.25, 0.50 y 0.75 m, el área inundada aumentó en 297, 1062 y 2152 kilómetros cuadrados, respectivamente, lo que demuestra que el área inundada de la Isla del Carmen aumentó significativamente (Díaz et al., 2019).

Moreno (2022) menciona que el aumento en las temperaturas globales causado por el calentamiento global ha aumentado el nivel medio del mar en los últimos años. Las variaciones baristáticas, que son cambios en la masa de agua originadas por el aumento de la temperatura en el mar y en la atmósfera, son uno de los principales procesos responsables de este aumento. Para lo cual, en su trabajo investigativo efectuó una revisión de la literatura sobre los cambios en el nivel del mar baristático, utilizando modelos climáticos para analizar la contribución de los mantos de hielo y glaciares sobre el continente al aumento del nivel medio del mar a partir de los cambios en su masa. Si bien es cierto la pérdida de masa de los cuerpos de hielo provoca movimientos verticales en la corteza terrestre, de modo que contribuyen al nivel del mar a través de una distribución uniformemente. Para el año 2100, bajo un escenario SSP5-8.5, se anticipa una aportación baristática al nivel relativo del mar de 0.4 – 0.5 m en las latitudes bajas y medias, de 0.1 - 0.3 m en las latitudes altas y un descenso relativo de 0,6 m en la región de Groenlandia. Finalmente, se descubrió que las variaciones baristáticas proyectan un aumento promedio del nivel del mar de 0.45 metros para el Mar Caribe.

En la Península de Corea se efectuó una estimación de salinidad a una profundidad de 10 m (S10m) utilizando un modelo de red neuronal convolucional (CNN) basado en mediciones multisatélite y analizar las variaciones de volumen de CDW. La masa principal de RCD en el ECS alcanzó aproximadamente 10 m de profundidad; por lo tanto, el modelo CNN se desarrolló utilizando factores físicos de la superficie del mar como entrada y S10m in situ obtenidos del Instituto Nacional de Ciencias Pesqueras (NIFS) como datos reales sobre el terreno de 2015 a 2021. A diferencia de la distribución de la superficie del mar, la distribución espacial de S10m mostró que los TID estaban predominantemente presentes en el centro del ECS. Después de calcular el volumen de los RCD desde la superficie hasta una profundidad de 10 m, se representaron los volúmenes máximos ( $3.01 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ) y mínimo ( $1.31 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ) en 2016 y 2018, respectivamente. Finalmente, se analizó



el efecto de calentamiento inducido por los cambios en el volumen de CDW en los años mencionados previamente (Kim et al., 2023).

Segge y Mauerhofer (2023) en cuanto al análisis de contenido de la planificación urbana para evaluar los enfoques relativos de adaptación mediante la categorización y comparación de los indicadores de progreso, se realizó un mapa de Colombia, en el cual refleja las estaciones mareográficas y las costas del Pacífico y el Caribe. Los resultados muestran que durante los últimos diez años (2013 – 2022), el número de municipios que han abordado el incremento del nivel del mar ha aumentado en particular (43%) a través de documentos de planificación. Esto a su vez respalda las tendencias globales de mayor atención a la adaptación urbana al desajuste climático.

Nevermann et al. (2023) ostenta que el nivel del mar ha aumentado significativamente en las últimas décadas a comparación de años anteriores. Por otra parte, recalca que, durante el próximo siglo, la infraestructura, los empleos locales, el medio ambiente y la población humana se verán seriamente amenazados, especialmente en las zonas costeras. Este artículo investiga los efectos del aumento del nivel del mar en la posible pérdida de tierras a lo largo de las costas del Caribe y el Pacífico de Colombia utilizando la comprensión más actualizada del sistema climático y el cambio climático. El Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático, se utilizó para determinar el área en riesgo de pérdida de tierra.

La alteración climática es uno de los desafíos más importantes a nivel mundial, ya que su impacto es particularmente severo en las aguas costeras del Ecuador, por ende, se efectuó el estudio en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Guayas y El Oro, a través de búsquedas bibliográficas y exploración de datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), los cuales fueron ingresados en el software Ocean Data View (ODV), el cual permitió elaborar gráficos y mapas oceanográficos que permitieron comprender el comportamiento de las variables (TSM, precipitación, salinidad y velocidad del viento) con la finalidad de identificar las provincias más expuestas a este fenómeno. Los resultados indicaron que la provincia de Guayas es la más afectada, dado que es influenciada por la fría corriente de Humboldt y las cálidas corrientes oceánicas de El Niño con una temperatura promedio anual de 24.2 °C y una precipitación promedio anual de 2.81 mm (Molina y Morán, 2023).

Al recuperar datos históricos en la plataforma oficial de la NOAA (Administración Nacional Oceánica), se logró una visión general de los cambios en las variables climáticas costeras "temperatura de la superficie del mar" y "salinidad" en la isla principal de las Islas Galápagos en el período del 2000 al 2020. Para lo cual, se llevó a cabo un análisis adicional empleando el programa Ocean Data View (ODV), como resultado se encontró que la temperatura y la salinidad de la superficie del mar aumentaron, dado que su aumento fue visible desde el primer año, pero de 2009 a 2010, esta percepción del cambio es más evidente. Se encontró que, durante el período definido en este estudio, la temperatura de la superficie del mar mostró un cambio drástico, la cual tendió a aumentar y alcanzar los 5 °C respecto al primer año de mediciones, puesto que además tiene una relación directa con la salinidad, una altura de 0.6 PSU (Plaza, 2023).

## **2.2 Bases científicas**

### **2.2.1 Parámetros Climáticos**

#### **2.2.1.1. Temperatura del Mar (TSM).**

La temperatura de la superficie del mar se considera una variable climática y oceánica muy importante porque puede afectar físicamente los cuerpos de agua, como cambiar su densidad (**Ver Anexo N°1, Figura 29**). Esta temperatura cambia debido al intercambio de temperatura entre la atmósfera y la capa superficial del océano. Sus cambios afectan significativamente el pronóstico climático, la formación de huracanes y, por supuesto, el clima regional y global. Además, la expansión térmica del océano regula el aumento del nivel del mar. De esta manera, tiene un impacto importante en la biología marina al afectar la tasa de crecimiento de muchos microorganismos. El aumento de las temperaturas del océano se ha relacionado con el blanqueamiento de los corales, la proliferación de algas nocivas y la migración de ciertos vertebrados marinos. Por otro lado, algunos procesos químicos pueden verse afectados por los cambios en la temperatura del océano y el continuo intercambio de gases entre el océano y la atmósfera (Álvarez y Ruiz, 2021).

#### **2.2.1.1.1. Capa superficial o epilimnion.**

Es la capa superior de un cuerpo de agua, con una profundidad de 200 m; se encuentra directamente expuesta a la atmósfera y la radiación solar, por lo cual se la denomina epilimnion. Debido a su exposición directa al Sol y a la mezcla

constante de vientos superficiales, esta capa tiene una temperatura más cálida (12 a 30 °C según su latitud) y uniforme que las capas inferiores. Según Wetzel (2001) el epilimnion facilita procesos como la fotosíntesis y la respiración, es esencial para el intercambio de gases con la atmósfera.

#### **2.2.1.1.2. Capa de transición o metalimnion.**

De acuerdo con Wetzel (2001) la termoclina se produce cuando la densidad y la temperatura del agua cambian rápidamente con la profundidad. Esta capa puede llegar a 1000 m de profundidad, además, actúa como una barrera que impide que las capas superficiales más cálidas (menos densas) y las profundas más frías (más densas) se mezclen verticalmente, lo que crea condiciones estables para la estratificación térmica y tiene un impacto en la distribución de oxígeno y nutrientes en el ecosistema acuático.

#### **2.2.1.1.3. Capa profunda o hipolimnion.**

Debido a la escasa mezcla con las capas superiores, esta capa se caracteriza por mantener una temperatura constante y fría (0 – 5 °C), que generalmente no varía mucho a lo largo del año (Wetzel, 2001). El hipolimnion puede ser esencial para la ciclización de nutrientes en ecosistemas acuáticos profundos y proporciona un hábitat único para organismos que prefieren aguas más frías, con un déficit de oxígeno disuelto.

### **2.2.1.2. Tipos de satélites.**

#### **2.2.1.2.1. Satélites polares.**

Estos satélites orbitan la Tierra pasando cerca de ambos polos en dirección norte-sur en cada vuelta, la cual se da cada 90 minutos; por lo general suelen localizarse a unos 700 km de la Tierra (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial [INTA], 2025). Son ideales para la recolección de datos geográficos, el monitoreo ambiental, la meteorología y la observación de la Tierra.

**Polar Orbitan Enviromental Satellites (POES):** El Proyecto del Satélite Ambiental Operacional Polar (POES) es un proyecto financiado por la NOAA para construir y lanzar satélites operacionales. El GSFC construye e integra los satélites, luego de lo cual la NOAA asume el control operativo. Cada satélite, lleva varios instrumentos científicos incluidos dos para búsqueda y rescate. Todos los satélites del proyecto POES han sido lanzados como se visualiza en la (**Ver Anexo N°2, Tabla 8**), con NOAA-19 como el último en febrero de 2009 (National Aeronautics

and Space Administration [NASA], 2023). Estos satélites proporcionan datos continuos y confiables que mejoran la calidad de vida humana y protegen el medio ambiente terrestre (**Ver Anexo N°1, Figura 30**).

- **Sensor cósmico térmico AVHRR-Pathfinder:** Este sensor determina parámetros hidrológicos y para medir la radiación emitida y reflejada en varias bandas espectrales, midiendo desde la porción visible del espectro hasta la infrarroja térmica (Cerdeira et al., 2000). Este sensor permite la estimación de la TSM y la salinidad del océano.
- **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS):** Es un espectrorradiómetro que puede capturar imágenes en una variedad de bandas espectrales, desde el infrarrojo térmico hasta el visible (González M. , 2020). Además, permite monitorear la TSM, cobertura de las nubes, la concentración de aerosoles y clorofila en el océano.
- **Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR):** Es un radiómetro de microondas que mide la radiación emitida por la superficie terrestre y marina, esto a su vez facilita la estimación de la TSM y humedad atmosférica (González M. , 2020).
- **Advanced Data Collection System (ADCS):** es un sistema Avanzado para la recolección de datos ambientales y meteorológicos, recibe y transmite datos de plataformas remotas (NOAA, 2024).
- **Attitude Determination and Control System (ADACS):** maneja la orientación del satélite usando sensores y actuadores para asegurar su correcta posición en el espacio (NOAA, 2024).
- **Automatic Picture Transmission / Low Rate Picture Transmission Green (APT/LRPT):** se encarga de la transmisión automática de imágenes en tiempo real a baja tasa (NOAA, 2024).
- **Communications (COMM):** transmite y recibe datos entre el satélite y las estaciones terrestres, asegurando una conectividad constante (NOAA, 2024).
- **Electrical Power System Green (EPS):** sistema de energía eléctrica que gestiona la generación, almacenamiento y distribución de energía a bordo del satélite, principalmente a través de paneles solares (NOAA, 2024).

- **High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS):** sondeador de radiación infrarroja de alta resolución utilizado para medir la temperatura y humedad atmosférica en diferentes niveles (NOAA, 2024).
- **Microwave Humidity Sounder (MHS):** sondeador de humedad por microondas que mide la humedad atmosférica y la precipitación, esencial para el análisis meteorológico (NOAA, 2024).
- **Search and Rescue Processor (SARP):** procesador de búsqueda y rescate que detecta señales de emergencia transmitidas desde balizas en la superficie terrestre, facilitando las operaciones de rescate (NOAA, 2024).
- **Search and Rescue Repeater (SARR):** repetidor de búsqueda y rescate que amplifica y retransmite las señales de emergencia para mejorar su alcance y recepción por parte de equipos de rescate (NOAA, 2024).
- **Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer (SBUV):** radiómetro UV de retrodispersión solar que mide la concentración de ozono en la atmósfera, crucial para el monitoreo de la capa de ozono (NOAA, 2024).
- **Space Environment Monitor (SEM):** monitor del entorno espacial que mide las partículas cargadas y el ambiente de radiación en el espacio, protegiendo tanto el satélite como sus instrumentos (NOAA, 2024).
- **Telemetry, Command, Control (TCC):** sistema de telemetría, comando y control que supervisa el estado del satélite, permite enviar comandos desde la Tierra y controla las operaciones del satélite (NOAA, 2024).
- **Thermal Control System (THERM):** sistema de control térmico que regula la temperatura del satélite, asegurando que todos los componentes operen dentro de sus rangos de temperatura óptimos (NOAA, 2024).

#### **2.2.1.2.2. Satélites geoestacionarios.**

Son aquellos que avanzan por encima del Ecuador en dirección este-este, siguen la rotación y dirección de la Tierra, cada 24 horas (INTA, 2025). Se utilizan principalmente para telecomunicaciones, transmisión de televisión y radio, meteorología y sistemas de navegación como GPS.

**Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES):** el cuarto y último satélite de la Serie R de Satélites Ambientales Operacionales Geoestacionarios (GOES), el sistema de observación meteorológica y monitoreo ambiental más avanzado del hemisferio occidental, es el GOES-U de NOAA (**Ver**

**Anexo N°1, Figura 31).** La serie GOES-R ofrece monitoreo del clima espacial, mapeo en tiempo real de la actividad de los rayos e imágenes y mediciones atmosféricas avanzadas (National Environmental Satellite, Data, and Information Service [NOAA] , 2023).

- **Advanced Baseline Imager (ABI):** es una cámara multispectral que captura imágenes en múltiples bandas espectrales, desde el infrarrojo térmico hasta el visible (NOAA, 2023). Esta a su vez, permite el seguimiento continuo de la TSM, la evolución de los sistemas meteorológicos y la detección de los fenómenos climáticos extremos como huracanes.
- **Geostationary Lightning Mapper (GLM):** este radiómetro permite detectar y localizar rayos en tiempo real, además de ayudar a monitorear eventos climáticos que pueden afectar al nivel del mar y la atmósfera (NOAA, 2023).
- **Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Sensors (EXIS):** los satélites, las aerolíneas de gran altitud y las redes eléctricas de la Tierra podrían verse afectados por erupciones solares que interrumpen las comunicaciones y reducen la precisión de la navegación; la finalidad de EXIS es detectar estas erupciones (NOAA, 2023).
- **Magnetometer (MAG):** las mediciones del campo geomagnético son cruciales para brindar alertas y advertencias a una gran cantidad de clientes, incluidos operadores de satélite y empresas de energía (NOAA, 2023).
- **Space Environment In-Situ Suite (SEISS):** los datos de SEISS permiten evaluar el riesgo de descarga electrostática (ESD) y el peligro de radiación para astronautas o satélites (NOAA, 2023).
- **Solar Ultraviolet Imager (SUVI):** su principal función es realizar observaciones y caracterizar a las regiones activas complejas del Sol, erupciones solares y de filamentos solares que puedan repercutir en eyecciones de masa coronal (NOAA, 2023).

### **2.2.1.2.3. Satélites de comunicación.**

La industria espacial depende principalmente de los satélites de comunicaciones. En la primera década del siglo XXI, han experimentado un enorme crecimiento, lo que ha llevado a la existencia de más de 300 satélites de

comunicaciones en órbita geoestacionaria (González M. , 2020). En general, los satélites de comunicaciones son capaces de crear un canal que conecta diferentes lugares en la Tierra. A continuación, González, M (2020) indica los principales componentes de un satélite:

- **Transpondedores:** son los dispositivos que reciben, amplifican y retransmiten señales de comunicación.
- **Antenas de alta ganancia:** se utilizan para transmitir datos con alta precisión a largas distancias.
- **Equipos de enlace de datos:** son empleados para enviar datos meteorológicos a estaciones terrestres desde satélites.

### **2.2.1.3. Nivel del mar (SL).**

#### **2.2.1.3.1. Nivel instantáneo/ medio.**

El nivel del mar es la altura respecto a un datum de la superficie terrestre de la superficie de contacto entre la atmósfera y la masa oceánica. El nivel del mar cambia constantemente, por lo que solo se puede describir con precisión si se hace referencia a un momento determinado o a valores medios.

#### **2.2.1.3.2. Geoide y nivel del mar.**

El geoide es la superficie equipotencial de la gravedad terrestre, es decir, la figura creada al unir campos de gravedad de igual valor. Por lo tanto, es fácil entender que, en el caso de que las masas oceánicas estuviesen inmóviles, la superficie del nivel medio del mar se adapte aproximadamente (al ser un fluido) a la forma del geoide. De hecho, el concepto de nivel del mar está incluido en la definición de geoide (Fraile, 2011).

#### **2.2.1.3.3. Superficie topográfica del mar.**

La topografía dinámica del mar mide la altura de un punto en una superficie isobárica respecto a una referencia horizontal, eliminando la componente gravitatoria del geoide (Fraile, 2011). A escala global, la topografía dinámica es más suave que el geoide, con un rango espacial inferior a 2 metros. Las propiedades físicas del agua y las respuestas a los cambios de temperatura, junto con la dinámica de las corrientes superficiales, configuran esta superficie.

- **Corrientes marinas superficiales:** son el resultado de la interacción de diversas variables; el estrés del viento, influenciado por la fuerza de Coriolis, dirige el transporte de agua con un ángulo de 45° respecto a la

dirección del viento en la superficie del mar, según el modelo de Ekman (Pinet, 1992). La densidad de las masas de agua también influye en la escala oceánica, determinada por la salinidad y la temperatura (Periáñez, 2010). La salinidad varía con la evaporación local, siendo mayor en mares cerrados o semicerrados, y más homogénea en aguas oceánicas (alrededor de 36 ppm). Por último, la temperatura depende de la latitud y la circulación oceánica, presentando variaciones significativas (Fraile, 2011).

- **Presión atmosférica:** altera el nivel del mar en aproximadamente 1 cm por cada hPa (Doornkamp, 1990). Este efecto se debe a que las áreas de alta presión empujan hacia abajo la superficie del océano, mientras que las áreas de baja presión permiten que el agua se eleve. Aunque estas variaciones pueden parecer pequeñas, su impacto acumulativo es significativo en la dinámica oceánica, influyen en la elevación del nivel del mar y alteran las condiciones locales y regionales.
- **Vientos en la superficie del mar (SSW):** el viento también juega un papel crucial, pero su influencia es más local y temporal en comparación con su papel en la formación de corrientes marinas (Doornkamp, 1990). El viento puede apilar masas de agua, causando fluctuaciones en el nivel del mar en áreas específicas, este apilamiento se produce cuando el viento sopla sobre la superficie del océano, empujando el agua hacia la costa o hacia áreas donde encuentran resistencia (Fraile, 2011). Aunque estos efectos son menos continuos y más variables, pueden provocar cambios significativos en la topografía dinámica del mar, especialmente durante eventos meteorológicos extremos como tormentas y ciclones.
- **Salinidad de la superficie del mar (SSS):** la circulación termohalina depende de las diferencias en la densidad del agua, que están determinadas por la temperatura y la salinidad. Un aumento en la salinidad incrementa la densidad del agua, mientras que una disminución la reduce; lo cual produce el derretimiento de los glaciares o variaciones en la evaporación o precipitación, desestabilizando la circulación (Fraile, 2011).



#### **2.2.1.4. Altimetría satelital.**

##### **2.2.1.4.1. Topex/Poseidón.**

El satélite oceanográfico fue lanzado en 1992, diseñado por el CNES y la NASA, estudia la circulación oceánica con una precisión de 4.2 cm en la superficie del océano. Este satélite ha sido crucial para la predicción de fenómenos climáticos como El Niño/La Niña, influyendo en el clima global. Construido sobre la plataforma MMS de Fairchild Bus, tiene dimensiones de 5.5 m de largo, 6.6 m de alto y 2.8 m de ancho, con una masa de lanzamiento de 2388 kg (**Ver Anexo N°1, Figura 32**). Por último, se encuentra equipado con paneles solares que proporcionan 3.4 kW de potencia y comunicaciones a través de una antena de alta ganancia, utiliza la red TDRS de la NASA para la transmisión de datos (NASA, 1995).

- **Global Positioning System Antenna (GPS):** permiten que las aplicaciones de rastreo y localización de ubicación accedan a las constelaciones de satélites GPS/GNSS.
- **High-Gain Antenna (HGA):** es una antena con un haz de radio estrecho que se utiliza para aumentar la intensidad de la señal.
- **Attitude Control Module (ACM):** es el proceso de adquisición y mantenimiento de una determinada orientación en el espacio. Una maniobra de actitud es el proceso de reorientación del vehículo espacial de una actitud a otra.
- **Propulsion module:** puede ajustar la órbita inicial del lanzamiento y realizar mantenimiento orbital usando sistemas de hidracina y ruedas de inercia para controlar la órbita y la actitud del satélite.
- **Doppler Tracking Antenna (DORIS):** este dispositivo utiliza técnicas Doppler de microondas (cambios en la frecuencia de radio correspondientes a la velocidad relativa) para rastrear la nave espacial.
- **Altimeter Antenna:** es un instrumento utilizado para medir la altitud de un objeto por encima de un nivel fijo.
- **Laser Retroreflector Array (LRA):** refleja señales láser de estaciones terrestres para obtener datos precisos de seguimiento orbital y calibración del altímetro.

#### 2.2.1.4.2. Jason-1.

Es el sucesor de Topex/Poseidon, mide la topografía de la superficie del mar desde 2001 y fue seguido por Jason-2 en 2008. Jason-1 mide cambios en el nivel del mar con alta precisión, ayudando a entender el cambio climático y la circulación oceánica (**Ver Anexo N°1, Figura 33**). Los datos mejoran predicciones meteorológicas y climáticas, además de aplicaciones prácticas como la navegación, la seguridad en operaciones marinas, la gestión pesquera y el monitoreo de mamíferos marinos (Hmong, 2002).

- **Poseidon-2:** el altímetro de radar mide Ku (13.575 GHz) y C (5.3 GHz); mide la altura significativa de las olas y la corrección ionosférica.
- **Jason Microwave radiometer (JMR):** radiómetro de microondas pasivo que mide temperaturas de brillo a 8.7, 23.8 y 34 GHz, proporcionando correcciones de retraso de ruta para el altímetro (NASA, 2024).
- **Doppler tracking antenna (DORIS):** sistema de determinación de órbita de precisión que ofrece correcciones ionosféricas y de posición, también útil para estudios geofísicos (NASA, 2024).
- **BlackJack:** receptor GPS de 16 canales que proporciona datos de posicionamiento adicionales a DORIS para mejorar la determinación precisa de órbita (NASA, 2024).
- **Turbo Rogue Space Receiver (TRSR):** receptor principal que apoya la determinación precisa de la órbita (NASA, 2024).
- **Laser Retroreflective Array (LRA):** actúa como objetivo de referencia para mediciones de seguimiento láser, ayudando a calcular la altitud del satélite (NASA, 2024).

#### 2.2.1.4.3. Jason-2.

Fue construido por Thales Alenia Space con la plataforma Proteus y el altímetro Poseidon-3, se lanzó en 2008 como parte de la Misión de Topografía de la Superficie Oceánica (OSTM) (**Ver Anexo N°1, Figura 34**). Proporcionó datos precisos sobre la altura de la superficie del mar, corrientes oceánicas y almacenamiento de calor, esenciales para comprender la relación entre la circulación oceánica y el cambio climático. La misión recopiló más de 15 años de datos climáticos, finalizando el 1 de octubre de 2019 debido al deterioro del sistema de energía. Tras su desmantelamiento, Jason-2 permanecerá en órbita durante al menos 500 a 1000 años (Randal, 2008).

- **Poseidon-3b:** mide el nivel de la superficie del mar, la velocidad del viento y la altura de las olas; es el principal instrumento de Jason-2, aportado por CNES.
- **Radiómetro avanzado por microondas (AMR):** calcula las perturbaciones atmosféricas causadas por la presencia de agua; desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA.
- **Sistemas de posición exacta del satélite en su órbita:** incluye DORIS (CNES), LRA (NASA) y GPSP (NASA/JPL) para una determinación precisa de la órbita del satélite.

#### **2.2.1.4.4. Jason-3.**

Fue una misión internacional liderada por la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA) de los Estados Unidos, en colaboración con la NASA, la agencia espacial francesa CNES y la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), fue lanzado el 17 de enero de 2016 a través del cohete Falcon 9 de SpaceX (NASA, 2024) (**Ver Anexo N°1, Figura 35**).

- **Poseidon-3b:** altímetro radar de doble frecuencia (Ku a 13.575 GHz y C a 5.3 GHz) que mide la distancia, la altura de las olas y realiza correcciones ionosféricas.
- **Doppler Tracking Antenna (DORIS):** sistema de determinación precisa de órbita (POD) que utiliza frecuencias de 401.25 MHz y 2036.25 MHz para seguimiento global y cálculo de efemérides orbitales.
- **Laser Retroreflective Array (LRA):** matriz de retrorreflectores láser que apoya la calibración y validación del POD.
- **GPSP:** receptor GPS que proporciona datos de posición adicionales para mejorar la determinación de órbita y los modelos del campo gravitatorio.
- **CARMEN-3:** instrumento del CNES que mide partículas de alta energía que pueden afectar al oscilador DORIS.
- **LPT:** telescopio de partículas ligeras proporcionado por JAXA, que complementa las mediciones de radiación de DORIS.
- **T2L2:** instrumento del CNES para la transferencia precisa de tiempo mediante enlace láser, utilizado para controlar el reloj en DORIS.

## **2.2.2 Variabilidad climática**

### **2.2.2.1. Expansión térmica (Efecto termoestérico).**

Los procesos de expansión térmica, también conocida como efecto termoestérico, responden al aumento de la temperatura del agua marina. Los líquidos experimentan cambios de volumen de menor intensidad, similares a la dilatación de un sólido a medida que aumenta su temperatura. Parece ser que los cambios en la temperatura media de los océanos están vinculados al calentamiento global causado por el efecto invernadero. Sin embargo, aunque la expansión térmica pueda parecer un impacto pequeño a corto plazo, su huella acumulativa a lo largo de las décadas y siglos puede resultar en un aumento significativo del nivel del mar, contribuyendo a la inundación de zonas costeras y afectando a millones de personas que habitan en áreas bajas.

### **2.2.2.1. Evento El Niño y Ondas Kelvin.**

La Onda Kelvin Ecuatorial (OKE) es una onda de gravedad especial influenciada por la rotación de la Tierra y confinada en el Pacífico ecuatorial, donde concentra la capa superior del mar relativamente cálido y eleva el nivel del mar; actualmente recorren 6 000 kilómetros de distancia en el lado opuesto de la Antártida, impulsando una alta tasa de derretimiento de hielo marino en la Península Antártica Occidental (Europa Press, 2017). Durante El Niño, el calentamiento del Pacífico tropical modifica las corrientes oceánicas y distribuye más calor hacia la Antártida, contribuyendo al derretimiento de las plataformas de hielo y elevando el nivel del mar (**Ver Anexo N°1, Figura 36**).

### **2.2.2.2. Ondas de Rossby.**

Las ondas de Rossby son fenómenos atmosféricos globales descubiertos por Carl-Gustaf Rossby, cruciales para los patrones de teleconexión climática (Celdrán, 2023). Se caracteriza por tener una escala temporal que va desde días hasta meses, y una escala espacial que puede abarcar desde cientos de kilómetros hasta la circunferencia completa del globo terrestre, sin embargo, viajan de este a oeste, contrario a la rotación de la Tierra. Estas ondas se originan debido a perturbaciones en el flujo atmosférico provocadas por la interacción del aire con la compleja orografía terrestre, desestabiliza el sistema, dando lugar a patrones de ondas de gran longitud y amplitud. Estas ondas son desviadas y transportadas por las corrientes en chorro, especialmente el chorro polar, que afecta significativamente a la Península Ibérica al confluir masas de aire de cálido y fríos

procedentes de latitudes ecuatoriales y polares, respectivamente (**Ver Anexo N°1, Figura 37**).

### **2.2.2.3. Intercambio de calor entre océano y atmósfera.**

La temperatura media de la Tierra y su distribución geográfica están influenciadas por el sistema océano-atmósfera, controlado por el equilibrio radiativo y la distribución del calor. El equilibrio radiativo está determinado por los gases de efecto invernadero y el albedo, mientras que la distribución de calor depende de las corrientes oceánicas, los vientos y el intercambio de calor entre el océano y la atmósfera (Echevarría et al., 2022). Los océanos, con su alta capacidad de almacenamiento de calor, también juegan un papel crucial.

#### **2.2.2.3.1. Albedo y gases de efecto invernadero.**

El Sol, con una temperatura de unos 5600 °C, emite radiación de longitudes de ondas cortas (máximo en 0.5  $\mu\text{m}$ ) que atraviesan la atmósfera y llegan a la superficie terrestre. Sin embargo, la Tierra recibe solo una fracción mínima de esta radiación debido a su pequeño factor de visión respecto al Sol (aproximadamente  $2.2 \times 10^{-5}$ ). Por ello, la Tierra es mucho más fría y emite radiación de longitudes de ondas largas (alrededor de 10  $\mu\text{m}$ ). Los gases de efecto invernadero bloquean esta radiación saliente, calentando la atmósfera, que a su vez irradia la mitad de esta energía de regreso a la Tierra, aumentando aún más su temperatura (Echevarría et al., 2022).

La Tierra alcanza una temperatura en la cual la radiación entrante de onda corta y la mitad de la radiación de la atmósfera se equilibran. Pese a ello, parte de la radiación solar es reflejada al espacio por la atmósfera y la superficie terrestre, un fenómeno conocido como albedo planetario, que varía globalmente entre el 25% en los trópicos y el 65% en las regiones polares. Sin gases de efecto invernadero y con un albedo cero, la temperatura media de la Tierra sería unos 5.6 °C, mucho menor que la actual de 15 °C (Echevarría et al., 2022) (**Ver Anexo N°1, Figura 38**).

#### **2.2.2.3.2. Corrientes oceánicas y vientos atmosféricos.**

Las regiones tropicales, al recibir la radiación solar casi perpendicularmente, acumulan la mayor cantidad anual de calor por unidad de área, que debe ser distribuido a otras regiones del planeta. Sin océanos ni atmósfera, esta transferencia se realizaría únicamente por conducción a través de la litosfera, lo cual sería muy ineficiente, logrando solo un transporte latitudinal de unos  $10^4$  vatios.

Incluso con océanos y atmósfera, pero sin corriente ni vientos, el transporte de calor latitudinal solo aumentaría a unos  $10^6 - 10^7$  vatios (Echevarría et al., 2022).

Por otra parte, en latitudes bajas el transporte de calor es compartido de manera equitativa entre los océanos y los vientos, pero en latitudes intermedias y altas, los vientos son predominantes. No obstante, debido a la alta capacidad calorífica del agua, los océanos pueden almacenar aproximadamente 1000 veces más calor que la atmósfera, convirtiéndose en el principal regulador del aumento de la temperatura global. Los océanos han absorbido cerca del 90% de la anomalía térmica de la Tierra asociada con actividades humanas, pero su temperatura promedio solo se ha elevado unos  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo cual es diez veces menor que el aumento promedio de  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la superficie del mar (Echevarría et al., 2022) (**Ver Anexo N°1, Figura 39**).

#### ***2.2.2.3.3. Transporte de Ekman.***

El transporte de agua en la capa de Ekman se dirige a  $90^{\circ}$  a la derecha del viento en el hemisferio norte y a la izquierda en el hemisferio sur; cuando el viento sopla paralelo a la costa en el hemisferio norte, el transporte de Ekman lleva agua superficial mar adentro, lo que es compensado por agua que asciende desde mayores profundidades a la costa. Por otro lado, si el viento sopla en la dirección opuesta, el transporte de Ekman lleva agua superficial hacia la costa, causando que el agua más profunda se hunda y se desplace mar adentro cerca del fondo (González J. , 2020).

Estos movimientos de agua son cruciales para la regulación del clima y la productividad marina. La surgencia costera trae nutrientes desde las profundidades, promoviendo la proliferación de fitoplancton y enriqueciendo la biodiversidad marina. Este proceso también influye en la temperatura del agua costera, impactando la meteorología local y a su vez al clima global, haciendo de este fenómeno un factor clave en la interacción entre el océano y la atmósfera (**Ver Anexo N°1, Figura 40**).

#### ***2.2.2.3.4. Flujos de interacción océano-atmósfera.***

La interacción del viento con la superficie del mar genera movimientos turbulentos que mezclan el aire sobre la capa límite oceánica. Este proceso es crucial para la transferencia de calor y humedad (Díaz et al., 2004). Además, las ondas generadas por el viento provocan fluctuaciones verticales en la capa límite

contribuyendo a la mezcla vertical de propiedades como la temperatura y salinidad del agua marina. La turbulencia en la capa límite oceánica juega un papel fundamental en la regulación del clima y los patrones oceánicos, afectando procesos como la circulación termohalina y la distribución de nutrientes.

#### **2.2.2.5. Pérdida de masa de los mantos de hielo y glaciares.**

Las variaciones en la masa de los mantos de hielo, glaciares y casquetes polares afectan la distribución regional del aumento del nivel del mar debido a cambios en el campo gravitacional terrestre y el movimiento elástico de la corteza. Al mismo tiempo, provoca una disminución relativa del nivel del mar cerca de los mantos de hielo que se están reduciendo y un aumento superior al promedio global en áreas lejanas, alcanzando hasta un 20% más. Estas alteraciones pueden tener efectos desproporcionados en regiones distantes y vulnerables. Los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártida, son especialmente preocupantes, ya que el deshielo del manto de Groenlandia, podría elevar el nivel del mar en unos 7 m, de manera acelerada (Church et al., 2010) (**Ver Anexo N°1, Figura 41**) . Vale la pena señalar, que al no existir reducciones significativas en las emisiones de gases de efecto invernadero, es probable que este umbral se supere en el siglo XXI, lo que llevaría a un aumento inevitable del nivel del mar de varios metros, aunque el proceso completo tomaría cientos o miles de años.

#### **2.2.2.6. Variación baristática.**

La variación baristática es un factor crucial de la variabilidad climática, relacionada con los cambios en presión barométrica que afectan a la distribución del agua en los océanos (Church et al., 2010). Este fenómeno se manifiesta a través de fluctuaciones en el nivel del mar debido a las diferencias de presión atmosférica en diversas regiones. Cuando la presión atmosférica es alta, el nivel del mar tiende a descender, y cuando la presión es baja, el nivel del mar se eleva. Este efecto es especialmente notable en áreas propensas a ciclones y sistemas de alta presión, donde las variaciones baristáticas pueden provocar cambios significativos en el nivel del mar a corto plazo.

#### **2.2.2.7. Aguas superficiales, sumergidas y permafrost.**

##### **2.2.2.7.1. Aguas superficiales.**

El ciclo hidrológico al verse alterado por cambios en el clima (temperatura y precipitaciones), provoca un impacto en el volumen y distribución de aguas superficiales. Además, puede aumentar la frecuencia e intensidad de tormentas y

huracanes, los cuales tienen un impacto directo en aguas superficiales a través de inundaciones y cambios en los caudales de ríos o lagos (Fraile, 2011).

#### **2.2.2.7.2. Aguas sumergidas o subterráneas.**

La recarga de los acuíferos depende de la infiltración de agua superficial. La variabilidad climática puede alterar las precipitaciones y la evapotranspiración, lo que puede afectar la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y recargar los acuíferos. Del mismo modo que, el aumento del nivel del mar pueda causar que el agua salina ingrese a los acuíferos costeros, contaminando las fuentes de agua dulce subterránea (Fraile, 2011).

#### **2.2.2.8.2. Permafrost.**

El deshielo del permafrost está siendo causado por la crisis climática, lo que está liberando grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> almacenados en el suelo, acelerando aún más el calentamiento del planeta. El deshielo del permafrost libera agua que se había congelado en el suelo, aumentando el nivel del mar al agregarse a los sistemas de aguas superficiales y océanos (Fraile, 2011).

#### **2.2.2.8. Cambios del nivel del mar.**

Los cambios del nivel del mar debido a la perturbación climática, son principalmente causados por variaciones en la cantidad de agua líquida en las cuencas oceánicas (Fraile, 2011). Esto se debe en gran medida, al aumento o disminución del volumen del hielo terrestre, como el de los inlandsis y los glaciares de montaña (**Ver Anexo N°1, Figura 42**). En menor medida, estos cambios también se deben a la expansión térmica del agua oceánica resultante de las modificaciones en su temperatura.

##### **2.2.2.8.1. Eustasia/ Cambios Eustásicos.**

Hasta mediados del siglo XX, la palabra "Eustasia" se utilizaba tradicionalmente para referirse a los cambios del nivel del mar que se consideraban globales, de un solo signo y que ocurrían simultáneamente. Mörner (1986) redefine el concepto de Eustasia como "cambio en el nivel del mar debido a cualquier causa". Sin embargo, los factores determinantes son la flexión del fondo marino y sus sedimentos, por un lado, afecta el volumen de la cuenca y, por otra parte, conlleva al derretimiento neto del hielo que afecta el volumen. A continuación, se detallan los cinco factores principales que determinan el cambio del nivel del mar:



- **Glacioeustasia:** cambios en el volumen de agua por desarrollo de masas de hielo.
- **Tecnoeustasia:** cambios en el volumen de la cuenca por movimientos tectónicos.
- **Eutasia geoidal:** cambios topográficos en el geoide
- **Cambios dinámicos:** cambios en la topografía de la superficie del mar, como consecuencia a los cambios de intensidad-volumen de las corrientes superficiales del mar, así como ocurre en la corriente del Golfo que provoca un relieve de hasta 5 m. Por su parte, El Niño de E-O en el Pacífico Central origina pendientes positivas y negativas de 0.3 m.
- **Eutasia rotacional:** son procedentes de los cambios decadales en la tasa de rotación de la Tierra, además, tienen el potencial de redistribuir las masas de agua oceánica, esto podría ocurrir durante los "Eventos super-ENSO".

#### **2.2.2.8.2. Cuencas oceánicas.**

Los cambios en el nivel del mar también pueden estar influenciados por fenómenos tectónicos globales, como la aparición de nuevas islas y cordilleras, grandes movimientos de subducción y la formación de nuevas cuencas oceánicas (Fraile, 2011). Aunque estos procesos tectónicos no alteran el volumen ni la densidad de la masa de agua oceánica, sí modifican la capacidad de las cuencas oceánicas. La formación de nuevas cuencas oceánicas puede provocar una redistribución del agua, afectando el nivel del mar regionalmente. Además, los movimientos de subducción pueden llevar al hundimiento de la corteza terrestre en ciertas regiones, aumentando el nivel del mar localmente. Estos cambios tectónicos, aunque más lentos y menos perceptibles a corto plazo comparados a los efectos de la fluctuación climática, son esenciales para comprender la dinámica a largo plazo del nivel del mar y su impacto en las costas.

#### **2.2.2.8.3. Circulación oceánica y mareas.**

En el hemisferio norte, las células de circulación horaria elevan el nivel del mar, mientras que las antihorarias lo bajan, aunque estos cambios rara vez superan los 20 cm. El modelo conceptual del Océano Austral muestra tres segmentos verticales de circulación: corrientes superficiales superiores, masas medias de aguas profundas y corrientes inferiores del fondo (**Ver Anexo N°1, Figura 43**). El

agua del fondo antártico se forma por la congelación de las aguas de la plataforma antártica, aumentando la densidad del agua fría y salina (Shanmugam, 2020). Esto a su vez, provoca el hundimiento de la masa de agua por el talud continental y su propagación a otras partes del océano.

Las mareas, influenciadas por la interacción gravitatoria entre la Tierra, la Luna y el Sol, son la principal causa de variaciones a corto plazo en el nivel del mar, afectando procesos físicos y biológicos en la zona litoral. La Luna, pese a su menor masa comparada con el Sol, tiene una mayor influencia gravitatoria debido a su proximidad, controlando los ciclos de ascenso y descenso del mar. La interacción con los continentes, la fuerza de Coriolis y el gradiente de presión organizan las mareas en sistemas anfidrómicos alrededor de centros donde no hay movimiento mareal perceptible. La Luna, en su desplazamiento diario de  $373^\circ$  hacia el este, genera dos mareas altas y dos bajas en aproximadamente 24 horas y 50 minutos, resultando en un ciclo semidiurno de alrededor de 12 horas y 35 minutos. Las posiciones relativas del sistema solar causan mareas vivas (14 días) y muertas (14 días) dando un total de 28 días (**Ver Anexo N°1, Figura 44**). La mayor amplitud de marea se da cuando el Sol y la Luna están en conjunción alineados en el plano de la eclíptica, la Luna está en perigeo con respecto a la Tierra, la cual se encuentra con respecto al Sol.

### ***2.2.3 Sistema de alerta temprana para amenazas que enfrenta la variabilidad climática en el nivel del mar***

#### **2.2.3.1. Sistema de alerta temprana.**

Es una pieza fundamental para la prevención y respuesta efectiva ante fenómenos naturales, además su importancia reside en la capacidad de comunicar de manera oportuna a una población específica, permitiendo que esta comprenda y reaccione adecuadamente ante situaciones de peligro (**Ver Anexo N°1, Figura 45**). Por ende, es vital que los residentes locales dispongan de la información correcta y de los mecanismos necesarios para tomar decisiones informada (Gutierrez, 2022). Adicionalmente, la integración de tecnologías avanzadas, como sistemas de alerta temprana y aplicaciones móviles de emergencia, puede mejorar significativamente la rapidez y precisión de la comunicación. La educación continua y la realización de simulacros periódicos también son componentes fundamentales, ya que preparan a la población para actuar de manera eficiente y coordinada. La colaboración entre gobiernos, organizaciones no gubernamentales y la comunidad

es esencial para desarrollar estrategias integrales de gestión del riesgo, garantizando que todos los sectores de la sociedad estén preparados para enfrentar los desafíos que presentan los fenómenos naturales. En última instancia, estas acciones no solo protegen vidas, sino que también fortalecen la resiliencia de las comunidades, permitiéndoles recuperarse más rápidamente y con menores pérdidas.

### **2.2.3.2. Componentes de un SAT.**

#### **2.2.3.2.1. Conocimiento previo e identificación del riesgo.**

Se deben comprender y analizar los posibles riesgos a los que una comunidad o zona está expuesta (Budimir et al., 2021).

- **Evaluación de amenazas:** se basa en la identificación de peligros naturales (como terremotos, huracanes, inundaciones) o por causas antropogénicas.
- **Vulnerabilidad y exposición:** consiste en evaluar el nivel de vulnerabilidad/exposición de las personas, infraestructuras y ecosistemas ante los riesgos.
- **Mapeo de riesgos:** radica en la creación de mapas que indiquen las zonas de mayor riesgo que pueden resultar afectadas.

#### **2.2.3.2.2. Servicio de seguimiento y alerta.**

Este componente se fundamenta en el monitoreo de las condiciones ambientales y emisión de alertas de manera científica, económica, adaptada al contexto, escalable y sostenible (Budimir et al., 2021).

- **Monitoreo continuo:** vigilancia de riesgos en tiempo real mediante el uso de tecnología y herramientas, tales como sensores, satélites o estaciones meteorológicas.
- **Detección temprana:** identificación de señales que demuestren un aumento de probabilidad de un desastre.
- **Emisión de alertas:** generación de alertas claras y precisas sobre la posibilidad de un riesgo, especificando el tipo de amenaza y las áreas que podrían verse afectadas.

#### **2.2.3.2.3. Difusión y comunicación.**

Las alertas e información sobre riesgos deben llegar a todos los involucrados de manera efectiva, por ende, deben ser accesibles, adaptables, claras, comprensibles, útiles y accionables (Budimir et al., 2021).

- **Canales de comunicación:** deben asegurar de que las alertas lleguen a la mayor cantidad de población posible, a través del uso de medios (radio, televisión, internet, sirenas, mensajes de texto).
- **Mensajes claros y comprensibles:** garantizar que la información difundida sea comprensible, precisa y clara para todas las audiencias.
- **Estrategias de alcance:** desarrollo de métodos para llegar a grupos vulnerables o difíciles de alcanzar, asegurándose que todos reciban la información necesaria.

#### **2.2.3.2.4. Capacidad de respuesta.**

El desarrollo y el acceso a los planes de preparación, los procedimientos operativos estándar, la capacitación, la educación y los recursos antes de que ocurra algún desastre son esenciales para que todos entiendan su función y responsabilidad, con la finalidad de que se tomen las medidas adecuadas para evitar un desastre a mayor escala (Budimir et al., 2021).

- **Planes de emergencia:** crear y actualizar los planes de respuesta ante emergencias que incluyan evacuación, refugio y asistencia médica.
- **Simulacros y entrenamientos:** sirven para asegurarse de que la población y los servicios de emergencia sepan cómo reaccionar ante una alerta, se deben realizar ejercicios regulares.
- **Recursos y logística:** recursos necesarios como equipo de emergencia, suministros médicos y refugios, deben estar disponibles y ser accesibles.
- **Coordinación interinstitucional:** se debe asegurar que las agencias y organizaciones trabajen juntas para proporcionar una respuesta eficiente y efectiva.

#### **2.2.3.3. Factores de Riesgo.**

##### **2.2.3.3.1. El Niño-Oscilación (ENOS).**

Los datos satelitales han demostrado variaciones regionales significativas en la tasa de aumento del nivel del mar, que en algunas áreas ha sido cinco veces superior al promedio anual desde 1993. Esta variabilidad regional refleja en gran

medida la variabilidad climática, especialmente en el Océano Pacífico ecuatorial. Fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) afectan al movimiento del agua en los océanos, influenciando las pautas de viento y causando dilatación térmica del océano (Church et al., 2010). Durante el siglo XXI, la variabilidad climática continuará, y las poblaciones costeras se verán afectadas por el aumento del nivel del mar a largo plazo. Cabe destacar, que El ENOS podría exacerbar estos efectos al modificar las condiciones oceanográficas y climáticas regionales, aumentando el riesgo de inundaciones y salinización en áreas vulnerables.

#### **2.2.3.3.2. Inundación.**

- **Inundaciones permanentes (inundation):** se refiere a la ocupación constante o cíclica de superficies emergidas por aguas oceánicas, sin depender de factores externos como vientos, descargas fluviales o presión atmosférica (Fraile, 2011). Este tipo de inundación suele ser el resultado del aumento del nivel del mar debido a la crisis climática, afectando áreas costeras de manera irreversible.
- **Inundaciones episódicas (flooding):** son la ocupación temporal de superficies emergidas que normalmente están secas, a menudo provocadas por eventos extremos como tormentas o mareas altas (Fraile, 2011). Estas inundaciones son estocásticas, es decir ocurren de manera impredecible y están vinculadas a condiciones meteorológicas extremas.

#### **2.2.3.3.3. Erosión.**

Una de las principales consecuencias observables del aumento del nivel del mar puede ser la intensificación de los procesos de erosión en las costas expuestas, especialmente en las costas arenosas. En las playas arenosas, el nivel medio del mar es el factor principal que controla la línea costera y el perfil lateral asociado del equilibrio de la playa (Bruun, 1954; Slott, 1999). Un aumento del nivel medio del mar implica un retroceso general de la mayoría de los perfiles costeros, que aumentará o disminuirá dependiendo del aporte de sedimentos debido a efectos dinámicos longitudinales.

#### **2.2.3.3.4. Salinización.**

A medida que el nivel del mar aumenta, el agua salada puede penetrar en acuíferos costeros, ríos y tierras agrícolas, contaminando fuentes de agua dulce esenciales para el consumo humano, la agricultura y los ecosistemas locales

(NOAA, 2021). Este proceso puede llevar a la pérdida de tierras agrícolas productivas, afectando la inseguridad alimentaria y los medios de vida de las comunidades costeras. Adicionalmente, la salinización puede perjudicar infraestructuras, como carreteras y edificios, debido a la corrosión. La intrusión de agua salina también puede perturbar los hábitats naturales, amenazando la biodiversidad y la salud de los ecosistemas costeros.

#### **2.2.3.3.5. Ciclones Tropicales.**

El aumento del nivel del mar se hace más evidente durante episodios extremos como las mareas de tempestad asociadas a ciclones intensos, que han causado numerosas víctimas en países de baja elevación, como Bangladesh y Europa Occidental en 1953 y 1962; al igual que el huracán Katrina en Nueva Orleans y el ciclón Nargis en Myanmar (Fraile, 2011). Un análisis del siglo XX muestra que las inundaciones costeras son ahora más frecuentes para una altura dada, reflejando más las variaciones del nivel medio del mar que cambios en la frecuencia o intensidad de tempestades. En cuanto a la Antártida, los ciclones extratropicales y ciclones polar frontales, se desarrollan en las latitudes medias y altas del hemisferio sur. Estos sistemas de baja presión pueden traer vientos fuertes, precipitaciones y cambios en las temperaturas, impactando la extensión del hielo marino y las condiciones climáticas locales.

### **2.3 Marco legal**

#### **Constitución de la República del Ecuador (2008)**

##### **Título I**

##### **Elementos Constitutivos del Estado**

##### **Capítulo Primero**

##### **Principios Fundamentales**

**Art. 4.-** El territorio del Ecuador constituye una unidad geográfica e histórica de dimensiones naturales, sociales y culturales, legado de nuestros antepasados y pueblos ancestrales. Este territorio comprende el espacio continental y marítimo, las islas adyacentes, el mar territorial, el Archipiélago de Galápagos, el suelo, la plataforma submarina, el subsuelo y el espacio suprayacente continental, insular y marítimo.

El Estado ecuatoriano ejercerá derechos sobre los segmentos correspondientes de la órbita sincrónica geostacionaria, los espacios marítimos y la Antártida (p. 9).

##### **Título VII**

##### **Régimen Del Buen Vivir**

##### **Capítulo II**

##### **Biodiversidad y Recursos Naturales**

##### **Sección Primera**

##### **Naturaleza y Ambiente**

**Art. 395.-** La Constitución reconoce los siguientes principios ambientales:

1. El Estado garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural, que conserve la biodiversidad y la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas, y asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras.
2. Las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán de obligatorio cumplimiento por parte del Estado en todos sus niveles y por todas las personas naturales o jurídicas en el territorio nacional.
3. El Estado garantizará la participación activa y permanente de las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades afectadas, en la planificación, ejecución y control de toda actividad que genere impactos ambientales.
4. En caso de duda sobre el alcance de las disposiciones legales en materia ambiental, éstas se aplicarán en el sentido más favorable a la protección de la naturaleza (p. 188).

**Art. 397.-** En caso de daños ambientales el Estado actuará de manera inmediata y subsidiaria para garantizar la salud y la restauración de los ecosistemas. Además de la sanción correspondiente, el Estado repetirá contra el operador de la actividad que produjera el daño las obligaciones que conlleve la reparación integral, en las condiciones y con los procedimientos que la ley establezca. La responsabilidad también recaerá sobre las servidoras o servidores responsables de realizar el control ambiental. Para garantizar el derecho individual y colectivo a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, el Estado se compromete a:

1. Permitir a cualquier persona natural o jurídica, colectividad o grupo humano, ejercer las acciones legales y acudir a los órganos judiciales y administrativos, sin perjuicio de su interés directo, para obtener de ellos la tutela efectiva en materia ambiental, incluyendo la posibilidad de solicitar medidas cautelares que permitan cesar la amenaza o el daño ambiental materia de litigio. La carga de la prueba sobre la inexistencia de daño potencial o real recaerá sobre el gestor de la actividad o el demandado.
2. Establecer mecanismos efectivos de prevención y control de la contaminación ambiental, de recuperación de espacios naturales degradados y de manejo sustentable de los recursos naturales.
3. Regular la producción, importación, distribución, uso y disposición final de materiales tóxicos y peligrosos para las personas o el ambiente.
3. Asegurar la intangibilidad de las áreas naturales protegidas, de tal forma que se garantice la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de las funciones ecológicas de los ecosistemas. El manejo y administración de las áreas naturales protegidas estará a cargo del Estado.
4. Establecer un sistema nacional de prevención, gestión de riesgos y desastres naturales, basado en los principios de inmediatez, eficiencia, precaución, responsabilidad y solidaridad (p. 189).

**Art. 406.-** El Estado regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos y manglares, ecosistemas marinos y marinos-costeros (p. 191).

## **Tratado Antártico [TA] (1961)**

### **ARTÍCULO I**

1. La Antártida se utilizará exclusivamente para fines pacíficos. Se prohíbe entre otras, toda medida de carácter militar, tal como el establecimiento de bases y

fortificaciones militares, la realización de maniobras militares, así como los ensayos de toda clase de armas (p. 21).

#### **ARTICULO IX**

1. Los representantes de las Partes Contratantes, nombradas en el preámbulo del presente Tratado se reunirán en la ciudad de Canberra dentro de los dos meses después de la entrada en vigencia del presente Tratado y, en adelante, a intervalos y en lugares apropiados, con el fin de intercambiar informaciones, consultarse mutuamente sobre asuntos de interés común relacionados con la Antártida, y formular, considerar y recomendar a sus Gobiernos medidas para promover los principios y objetivos del presente Tratado, inclusive medidas relacionadas con:

- a) uso de la Antártida para fines exclusivamente pacíficos;
- b) facilidades para la investigación científica en la Antártida;
- c) facilidades para la cooperación científica internacional en la Antártida;
- e) cuestiones relacionadas con el ejercicio de la jurisdicción en la Antártida;
- f) protección y conservación de los recursos vivos de la Antártida (p. 24-25).

#### **Convención sobre la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos [CCRVMA] (1982)**

##### **ARTÍCULO II**

1. El objetivo de la presente Convención es la conservación de los recursos vivos marinos antárticos.

2. Para los fines de la presente Convención, el término “conservación” incluye la utilización racional.

3. Toda recolección y actividades conexas en la zona de aplicación de la presente Convención deberá realizarse de acuerdo con las disposiciones de la presente Convención y con los siguientes principios de conservación:

- c) prevención de cambios o minimización del riesgo de cambios en el ecosistema marino que no sean potencialmente reversibles en el lapso de dos o tres decenios teniendo en cuenta el estado de los conocimientos existentes acerca de las repercusiones directas e indirectas de la recolección, el efecto de la introducción de especies exóticas, los efectos de actividades conexas sobre el ecosistema marino y los efectos de los cambios ambientales, a fin de permitir la conservación sostenida de los recursos vivos marinos antárticos (p. 4).

##### **ARTÍCULO IX**

1. La función de la Comisión será llevar a efecto el objetivo y los principios establecidos en el artículo II de esta Convención. A este fin deberá:

- a) facilitar investigaciones y estudios completos sobre los recursos vivos marinos antárticos y sobre el ecosistema marino antártico;
- b) compilar datos sobre el estado y los cambios de población de los recursos vivos marinos antárticos y sobre los factores que afecten a la distribución, abundancia y productividad de las especies recolectadas y dependientes o de las especies o poblaciones afines;
- c) asegurar la adquisición de datos estadísticos de captura y esfuerzos con respecto a las poblaciones recolectadas;
- d) analizar, difundir y publicar la información mencionada en los apartados (b) y (c) supra y los informes del Comité Científico;
- e) determinar las necesidades de conservación y analizar la eficacia de las medidas de conservación;
- f) formular, adoptar y revisar medidas de conservación sobre la base de los datos científicos más exactos disponibles, con sujeción a las disposiciones del párrafo 5 del presente artículo;



- g) aplicar el sistema de observación e inspección establecido en virtud del artículo XXIV de esta Convención;
- h) realizar otras actividades que sean necesarias para alcanzar el objetivo de la presente Convención (p. 7-9).

## **ARTÍCULO XV**

1. El Comité Científico servirá de foro para la consulta y cooperación en lo relativo a la compilación, estudio e intercambio de información con respecto a los recursos vivos marinos a que se aplica la presente Convención. Alentará y fomentará la cooperación en la esfera de la investigación científica con el fin de ampliar el conocimiento de los recursos vivos marinos del ecosistema marino antártico.

2. El Comité Científico desarrollará las actividades que disponga la Comisión en cumplimiento del objetivo de la presente Convención, y deberá:

- a) establecer los criterios y métodos que hayan de utilizarse en las decisiones relativas a las medidas de conservación mencionadas en el artículo IX de esta Convención;
- b) evaluar regularmente el estado y las tendencias de las poblaciones de los recursos vivos marinos antárticos;
- c) analizar los datos relativos a los efectos directos e indirectos de la recolección en las poblaciones de los recursos vivos marinos antárticos;
- d) evaluar los efectos de los cambios propuestos en los métodos y niveles de recolección y de las medidas de conservación propuestas;
- e) transmitir a la Comisión evaluaciones, análisis, informes y recomendaciones, que le hayan sido solicitados o por iniciativa propia, sobre las medidas e investigaciones para cumplir el objetivo de la presente Convención;
- f) formular propuestas para la realización de programas internacionales y nacionales de investigación de los recursos vivos marinos antárticos.

3. En el desempeño de sus funciones, el Comité Científico tendrá en cuenta la labor de otras organizaciones técnicas y científicas competentes y las actividades científicas realizadas en el marco del Tratado Antártico (p. 12-13).

## **Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992)**

### **Artículo 3.- Principios**

Las Partes, en las medidas que adopten para lograr el objetivo de la Convención y aplicar sus disposiciones, se guiarán, entre otras cosas, por lo siguiente:

- 1. Las Partes deberían proteger el sistema climático en beneficio de las generaciones presentes y futuras, sobre la base de la equidad y de conformidad con sus responsabilidades comunes pero diferenciadas y sus respectivas capacidades. En consecuencia, las Partes que son países desarrollados deberían tomar la iniciativa en lo que respecta a combatir el cambio climático y sus efectos adversos.
- 2. Deberían tenerse plenamente en cuenta las necesidades específicas y las circunstancias especiales de las Partes que son países en desarrollo, especialmente aquellas que son particularmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático, y las de aquellas Partes, especialmente las Partes que son países en desarrollo, que tendrán que soportar una carga anormal o desproporcionada en virtud de la Convención.
- 3. Las Partes deberían tomar medidas de precaución para prever, prevenir o reducir al mínimo las causas del cambio climático y mitigar sus efectos adversos. Cuando haya amenaza de dato grave o irreversible, no debería utilizarse la falta de total certidumbre científica como razón para posponer tales medidas, tomando en cuenta

que las políticas y medidas para hacer frente al cambio climático deberían ser eficaces en función de los costos a fin de asegurar beneficios mundiales al menor costo posible. A tal fin, esas políticas y medidas deberían tener en cuenta los distintos contextos socioeconómicos, ser integrales, incluir todas las fuentes, sumideros y depósitos pertinentes de gases de efecto invernadero y abarcar todos los sectores económicos. Los esfuerzos para hacer frente al cambio climático pueden llevarse a cabo en cooperación entre las Partes interesadas.

**4.** Las Partes tienen derecho al desarrollo sostenible y deberían promoverlo. Las políticas y medidas para proteger el sistema climático contra el cambio inducido por el ser humano deberían ser apropiadas para las condiciones específicas de cada una de las Partes y estar integradas en los programas nacionales de desarrollo, tomando en cuenta que el crecimiento económico es esencial para la adopción de medidas encaminadas a hacer frente al cambio climático.

**5.** Las Partes deberían cooperar en la promoción de un sistema económico internacional abierto y propicio que condujera al crecimiento económico y desarrollos sostenibles de todas las Partes, particularmente de las Partes que son países en desarrollo, permitiéndoles de ese modo hacer frente en mejor forma a los problemas del cambio climático. Las medidas adoptadas para combatir el cambio climático, incluidas las unilaterales, no deberían constituir un medio de discriminación arbitraria o injustificable ni una restricción encubierta al comercio internacional (p. 3-4).

#### **Artículo 4.- Compromisos**

**1.** Todas las Partes, teniendo en cuenta sus responsabilidades comunes pero diferenciadas y el carácter específico de sus prioridades nacionales y regionales de desarrollo, de sus objetivos y de sus circunstancias, deberán:

**a)** Elaborar, actualizar periódicamente, publicar y facilitar a la Conferencia de las Partes, de conformidad con el artículo 12, inventarios nacionales de las emisiones antropógenas por las fuentes y de la absorción por los sumideros de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, utilizando metodologías comparables que habrán de ser acordadas por la Conferencia de las Partes;

**b)** Formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales y, según proceda, regionales, que contengan medidas orientadas a mitigar el cambio climático, teniendo en cuenta las emisiones antropógenas por las fuentes y la absorción por los sumideros de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, y medidas para facilitar la adaptación adecuada al cambio climático;

**c)** Promover y apoyar con su cooperación el desarrollo, la aplicación y la difusión, incluida la transferencia, de tecnologías, prácticas y procesos que controlen, reduzcan o prevengan las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal en todos los sectores pertinentes, entre ellos la energía, el transporte, la industria, la agricultura, la silvicultura y la gestión de desechos;

**d)** Promover la gestión sostenible y promover y apoyar con su cooperación la conservación y el reforzamiento, según proceda, de los sumideros y depósitos de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, inclusive la biomasa, los bosques y los océanos, así como otros ecosistemas terrestres, costeros y marinos (...) (p. 5-6).

## **Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) (2015)**

### **Artículo 2.**

1. El presente Acuerdo, al mejorar la aplicación de la Convención, incluido el logro de su objetivo, tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza, y para ello:

**a)** Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático;

**b)** Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos; y

**c)** Situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

2. El presente Acuerdo se aplicará de modo que refleje la equidad y el principio de las responsabilidades comunes pero diferenciadas y las 63 capacidades respectivas, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales (p. 3-4).

## **Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) (1998)**

Las Naciones Unidas (1998) indica que este tratado internacional que se estableció en 1997 en el Marco de la Organización de Naciones Unidas sobre el cambio climático, busca que los países industrializados, a excepción de Estados Unidos, reduzcan las emisiones de GEI, los cuales contribuyen en un 5% al calentamiento global. Ecuador está suscrito a este protocolo desde el 15 de enero de 1998.

### **Artículo 2**

1. Con el fin de promover el desarrollo sostenible, cada una de las Partes incluidas en el anexo I, al cumplir los compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos en virtud del artículo 3:

**a)** Aplicar y/o seguir elaborando políticas y medidas de conformidad con sus circunstancias nacionales, por ejemplo, las siguientes:

**iv)** investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales;

**v)** reducción progresiva o eliminación gradual de las deficiencias del mercado, los incentivos fiscales, las exenciones tributarias y arancelarias y las subvenciones que sean contrarios al objetivo de la Convención en todos los sectores emisores de gases de efecto invernadero y aplicación de instrumentos de mercado;

**vi)** fomento de reformas apropiadas en los sectores pertinentes con el fin de promover unas políticas y medidas que limiten o reduzcan las emisiones de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal;

**vii)** medidas para limitar y/o reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal en el sector del transporte;

**viii)** limitación y/o reducción de las emisiones de metano mediante su recuperación y utilización en la gestión de los desechos, así como en la producción, el transporte y la distribución de energía;(p.3)

## **Reuniones de los Administradores de Programas Antárticos Latinoamericanos (RAPAL) (1990)**

### **Objetivos**

- a)** Propiciar la cooperación y el apoyo mutuo en aspectos científicos, técnicos, logísticos y ambientales de los países latinoamericanos con actividades antárticas, a fin de aunar y coordinar esfuerzos, optimizando el empleo de los recursos, en concordancia con los principios y objetivos establecidos en el Sistema del Tratado Antártico, así como el intercambio de puntos de vista y, según sea apropiado, colaboración a nivel educativo, socio-cultural y comunicacional de relevancia en el área antártica.
- b)** Acrecentar y fortalecer la presencia y los intereses comunes de los países latinoamericanos en el área del Tratado Antártico.
- c)** Intercambiar información sobre los ordenamientos internos relativos a las actividades antárticas.
- d)** Coordinar las acciones de los países miembros de RAPAL, para adoptar en la medida de lo posible, posiciones comunes que reflejen las posiciones de los países latinoamericanos con actividades antárticas.
- e)** Contribuir a la protección y conservación del medio ambiente antártico y de sus ecosistemas dependientes y asociados.

### **XXVII RAPAL (Guayaquil, 2016)**

#### **Recomendación RAPAL XXVII-1**

Considerando la importancia de trabajar en el nuevo Plan Estratégico SCAR para ayudar a promover las actividades nacionales, así como fomentar una mayor colaboración, crear capacidad, y la revisión de una gran cantidad de actualizaciones de diversos grupos que puedan ser de interés específico para los países, en función de sus intereses particulares de la investigación.

La RAPAL recomienda:

Conformar un Grupo Intersesional presidido por Ecuador para desarrollar y contribuir dichos puntos para los próximos eventos del SCAR.

#### **Recomendación RAPAL XXVII-2**

Debido a la importancia de la aplicación de prototipos de ecomateriales que pueden llegar a ser más ecológicos, económicos y eficientes que los materiales convencionales de la industria de la construcción, para la protección del medio ambiente en el Territorio Antártico.

La RAPAL recomienda:

Que el Ecuador lidere una Red de Investigación en Ecomateriales la cual pretende la vinculación entre los institutos antárticos de diferentes países para que se produzca un aporte de investigación, experimentación, desarrollo y fabricación en ecomateriales.

#### **Recomendación RAPAL XXVII-3**

Que cada APAL presente en forma independiente al COMNAP información sobre los medios e infraestructura disponibles para el apoyo de las actividades científicas del próximo verano.

#### **Recomendación RAPAL XXVII-4**

Que los APAL prioricen la selección de proyectos que contemplen la cooperación internacional y cuyos resultados se publiquen en revistas indexadas.

Mantener y consolidar con la Academia el Congreso Latinoamericano de Ciencia Antártica en el siguiente orden: Chile, Argentina y Ecuador y en los años intermedios a los OSC-SCAR.

**Recomendación RAPAL XXVII-5**

Archivar o anular la recomendación XXVI-6 “Respaldar la realización de un simposio celebrando los 25 años de firma del Protocolo de Protección Ambiental que será coordinado por Perú, que desarrollará la idea y propondrá una metodología para la concreción del mismo” a solicitud de Perú.

**Recomendación RAPAL XXVII-6**

Activar la Red con el intercambio de opiniones al proyecto Refugio antártico ecuatoriano que se encuentra actualmente en ejecución, en aplicación de la

**Recomendación XXVI-9**

“El establecimiento de una Red Latinoamericana para el estudio de eco materiales para evaluar su aplicación en las instalaciones antárticas”.

**Recomendación RAPAL XXVII-7**

Intercambiar información acerca del uso de UAV's relacionados a los posibles impactos ambientales en los diferentes programas latinoamericanos para el desarrollo de un documento que pueda ser presentado en la próxima CPA. Se propone trabajar en el tiempo intersesional y que lidere Argentina.

**Recomendación RAPAL XXVII-8**

En el marco del 25 aniversario de la firma del Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente, que tendrá lugar el día 4 de octubre de 2016 y con el objeto de reafirmar el compromiso de los miembros de los Programas Nacionales Antárticos Latinoamericanos, hacia la protección del medio ambiente antártico y sus ecosistemas dependientes y asociados, destacando los vínculos existentes entre el continente sudamericano y el continente antártico, la RAPAL recomienda:

1. Que los APAL difundan activamente la publicación conmemorativa por los 25 años de la firma del Protocolo de Madrid, elaborada por el Comité de Protección Ambiental del Tratado Antártico y la “Declaración de Santiago”, adoptada durante la XXXIX RCTA, mediante los canales de difusión identificados durante los trabajos intersesionales, así como cualquier otra forma de difusión que se considere apropiada, de manera de hacer llegar dicha publicación a la mayor cantidad de público posible.
2. Que en dicha difusión, los APAL destaquen los vínculos ambientales, climáticos, geológicos, ecosistémicos e históricos que unen al continente sudamericano con el continente Antártico, mediante la difusión de los proyectos científicos que involucren el estudio de dichas interacciones.
3. Que se aliente un creciente desarrollo de líneas de investigación que permitan avanzar en el conocimiento de las interacciones entre el continente antártico y el continente sudamericano y que fomente la cooperación científica en este sentido.

**Recomendación RAPAL XXVII-9**

Teniendo en cuenta la importancia de la planificación oportuna de las actividades de las campañas de verano, y reconociendo las ventajas de realizar las reuniones en una época cercana al inicio del próximo verano.

La RAPAL recomienda:

Modificar los términos de referencia en el sentido de que las fechas de las reuniones RAPAL se realicen lo más próximas posibles al inicio de las campañas de verano de cada país, idealmente entre los meses de septiembre y octubre, a fin de mejorar las coordinaciones logísticas y operacionales para la Campaña estival austral siguiente.

### **Recomendación RAPAL XXVII-10**

Considerando que la actividad de buceo es una actividad de alto riesgo, especialmente en área antártica, y reconociendo que no existe todavía un criterio único en cuanto a los requisitos para ejercer esta actividad.

La RAPAL recomienda:

Conformar un Grupo de consultas intersesional con los siguientes términos:

- a. En el período intersesional hasta la XXVIII RAPAL se harán los contactos y análisis con base al documento DI-13 “Buceo polar en apoyo a las actividades de investigación” presentado por Brasil, a fin de estructurar las Normas comunes APAL para buceo antártico.
- b. Presentar los resultados de este trabajo en la XXVIII RAPAL, para su eventual adopción como Recomendación.
- c. Que Argentina actúe de coordinador del presente trabajo.

### **Recomendación RAPAL XXVII-11**

Dar por terminada la vigencia de la Recomendación RAPAL XXVI-10 y sustituir por la siguiente. -

Teniendo en cuenta la importancia de la prevención de los accidentes en la Antártida, y reconociendo las ventajas que pueden surgir del intercambio de experiencias en esta materia, que deriven en la unificación de criterios, métodos y procedimientos.

La RAPAL recomienda

- a. Dar por conocido el documento “Manual de Prevención de Accidentes Antárticos”, su formato de reporte anexo y agradecer a la delegación Argentina por su aporte.
- b. Establecer un link en la página web de la RAPAL con el formulario electrónico anexo, a cargo de Argentina.
- c. En el plazo de sesenta días a partir de su publicación en la página web de la RAPAL, los APAL hagan sus observaciones al formato del link antedicho, luego de lo cual se recomienda entre en vigencia, debiendo notificarse su entrada en vigor a cada uno de los puntos de contacto nacionales.
- d. Que a partir de su vigencia los países que tengan accidentes o incidentes reporten en el formato establecido a través del link, sin perjuicio que de forma voluntaria los APAL puedan subir informes sobre accidentes anteriores.
- e. Incluir en los términos de referencia la presentación por parte del país anfitrión de cada RAPAL, en sesión plenaria, un resumen de los accidentes o incidentes del último período intersesional, poniendo especial énfasis en las lecciones aprendidas.
- f. Se insta, no obstante, a hacer uso del Sistema de Reportes de Incidentes de COMNAP, ya implementado.

### **Modificación a la Recomendación RAPAL XXVI-11**

Teniendo en cuenta el uso creciente de vehículos aéreos pilotados a distancia (UAVs, drones o similares) en el área del Tratado Antártico, y considerando la necesidad de garantizar en lo inmediato la seguridad en las zonas de operaciones de aeronaves, en virtud de que el Tratado Antártico aún se encuentra evaluando las medidas regulatorias que permitan un uso seguro de estos equipos,

La RAPAL recomienda que:

- a. Se evite la operación de vehículos aéreos pilotados a distancia o sistemas de vehículos aéreos pilotados a distancia en espacios aéreos controlados o en el área de influencia de un aeródromo excepto que previamente se haya obtenido una autorización especial del prestador del servicio de tránsito aéreo o del jefe de aeródromo respectivo.

b. Los vehículos aéreos pilotados a distancia o sistemas de vehículos aéreos pilotados a distancia operen exclusivamente en horario diurno y en condiciones meteorológicas visuales que permitan su operación segura, a excepción que se trate de una operación de búsqueda y rescate (SAR).

c. Además, los vehículos señalados precedentemente deberán coordinar con las bases antárticas cercanas o las que se encuentren en la ruta de operación del vehículo aéreo pilotado a distancia, para navegaciones pre programadas. Especialmente en lugares donde operen aeronaves de ala rotatoria, en los espacios aéreos no controlados.

d. Que se incorporen en el AFIM (Antarctic Flight Information Manual) regulaciones sobre la utilización de estos medios, para incrementar la seguridad aérea en la zona.

#### **Recomendación RAPAL XXVII-13**

Considerando que la actividad postal es un importante instrumento de difusión y cultura durante las campañas antárticas que cada país realiza y con el afán de fortalecer la actividad en la región, se recomienda:

Incorporar en la página web de la RAPAL, una base de datos por país (nombre, correo electrónico y dirección postal) de los encargados de la actividad postal. Esta base de datos se actualizará anualmente, si fuera el caso. Ecuador se encargaría de recopilar la información de los países y enviarla al administrador del sitio web de la RAPAL.

#### **XXXIII RAPAL (QUITO, 2022)**

##### **Recomendación RAPAL XXXIII-1**

Instar como RAPAL a la Comisión Hidrográfica Antártica (CHA) de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) presenten en la XLV RCTA en el 2023, un informe sobre la situación actual de las actividades hidrográficas desarrolladas en la Región Antártida y las presentes y futuras necesidades. De igual manera, como RAPAL efectuar un compromiso de cada Programa Antártico en contribuir con el levantamiento de información hidrográfica durante sus diferentes Expediciones o Campañas, así como, apoyar a que este tema siga siendo considerado dentro del Plan Estratégico Plurianual de la RCTA.

##### **Recomendación RAPAL XXXIII-2**

Instar a los países miembros de RAPAL a participar activamente dentro del Sistema de Intercambio de Información (SEII) administrado por la Secretaría del Tratado Antártico (STA), para lo cual se recomienda aprovechar las oportunidades de capacitación en línea que ofrece la STA sobre el funcionamiento y procedimientos a seguir por cada país miembro del Tratado Antártico para remitir informes anuales al SEII; así como, involucrarse en el Grupo de Contacto Intersesional (GCI) de la RCTA liderado por España, relacionados al intercambio de información científica.

##### **Recomendación RAPAL XXXIII-3**

Elevar a sus autoridades competentes la conveniencia de efectuar; al menos una reunión de coordinación virtual previo a las siguientes RCTAs, con la finalidad de identificar temas, posiciones e intereses comunes, de fortalecer la actuación conjunta del bloque latinoamericano en la RCTA y de promover la paz, la cooperación internacional, la ciencia y la preservación ambiental en el continente antártico.

##### **Recomendación RAPAL XXXIII-4**

Considerar la preocupación por parte de los diferentes países antárticos sobre los protocolos sanitarios, esperando que los mismos vayan acorde a la evolución de

las enfermedades COVID-19, o el esquema de vacunación establecido por cada país.

#### **Recomendación RAPAL XXXIII-5**

Evaluar la posibilidad de instalar estaciones multiparamétricas adicionales a las existentes para la obtención de información oceanográfica y sísmica con el objeto de establecer una red que permita obtener y comparar información en beneficio de los APAL.

#### **Recomendación RAPAL XXXIII-6**

Crear un grupo de trabajo APAL coordinado por Chile, conformado por especialistas en contaminación de microplásticos que propongan metodologías de evaluación estandarizadas para la cuantificación de microplásticos en diversas matrices ambientales, protocolos para reducción de desechos plásticos y en donde se comparta información de los equipamientos que se utilizan en las diferentes estaciones y plataformas para el control de microplásticos.

#### **Recomendación RAPAL XXXIII-7**

Crear un grupo de trabajo coordinado por Ecuador, que analizará las características de la Isla Barrientos, y evaluará el mecanismo apropiado de conservación de esa área.

#### **Recomendación RAPAL XXXIII-8**

Incluir de forma permanente en las reuniones de la CACAT, un punto sobre los avances en temas de geoinformación, permitiendo que, a través de los documentos de información presentados por los diferentes países se informe sobre el progreso y logros conseguidos, en el marco de los lineamientos establecidos por el SCAR.

### **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (2018)**

#### **ODS 13 Acción por el clima**

#### **Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos**

El cambio climático es un fenómeno que afecta a todos los países y personas del mundo. El calentamiento global aumenta a un ritmo mucho más acelerado de lo previsto, convirtiéndose en uno de los mayores desafíos de la humanidad.

#### **Metas del Objetivo 13**

13.1 Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.

13.2 Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.

13.3 Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana (p. 62-63).

#### **ODS 14 Vida submarina**

#### **Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos**

El océano impulsa los sistemas mundiales que hacen de la Tierra un lugar habitable para el ser humano. Nuestra lluvia, el agua potable, el tiempo, el clima, los litorales, gran parte de nuestra comida e incluso el oxígeno del aire que respiramos lo proporciona y regula el mar.

#### **Metas del Objetivo 14**

14.1 De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes.



**14.2** De aquí a 2020, gestionar y proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros para evitar efectos adversos importantes, incluso fortaleciendo su resiliencia, y adoptar medidas para restaurarlos a fin de restablecer la salud y la productividad de los océanos.

**14.3** Minimizar y abordar los efectos de la acidificación de los océanos, incluso mediante una mayor cooperación científica a todos los niveles

**14.5** De aquí a 2020, conservar al menos el 10% de las zonas costeras y marinas, de conformidad con las leyes nacionales y el derecho internacional y sobre la base de la mejor información científica disponible

**14.a** Aumentar los conocimientos científicos, desarrollar la capacidad de investigación y transferir tecnología marina, teniendo en cuenta los Criterios y Directrices para la Transferencia de Tecnología Marina de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental, a fin de mejorar la salud de los océanos y potenciar la contribución de la biodiversidad marina al desarrollo de los países en desarrollo, en particular los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países menos adelantados (p. 65-67).

### **Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2023)**

#### **A. Situación actual y tendencias**

##### **Cambios e impactos observados**

**A.2** Se han producido cambios rápidos y generalizados en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biosfera. El cambio climático causado por el hombre ya está afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del mundo. Esto ha provocado impactos adversos generalizados y pérdidas y daños conexos a la naturaleza y a las personas (nivel de confianza alto). Las comunidades vulnerables que históricamente han contribuido menos al cambio climático actual se ven afectadas de manera desproporcionada (nivel de confianza alto) (p. 11).

**A.2.1** Es inequívoco que la influencia humana ha calentado la atmósfera, el océano y la tierra. El nivel medio global del mar aumentó 0,20 [0,15 a 0,25] m entre 1901 y 2018. La tasa promedio de aumento del nivel del mar fue de 1,3 [0,6 a 2,1] mm año<sup>-1</sup> entre 1901 y 1971, aumentando a 1,9 [0,8 a 2,9] mm año<sup>-1</sup> entre 1971 y 2006, y aumentó aún más a 3,7 [3,2 a 4,2] mm año<sup>-1</sup> entre 2006 y 2018 (confianza alta). Es muy probable que la influencia humana haya sido el principal impulsor de estos aumentos desde al menos 1971. La evidencia de cambios observados en extremos como olas de calor, fuertes precipitaciones, sequías y ciclones tropicales y, en particular, su atribución a la influencia humana, se ha fortalecido aún más desde entonces. AR5. Es probable que la influencia humana haya aumentado la posibilidad de que se produzcan fenómenos extremos compuestos desde la década de 1950, incluidos aumentos en la frecuencia de olas de calor y sequías simultáneas (nivel de confianza alto) (p. 11).

#### **B. Cambio climático futuro, riesgos y respuestas a largo plazo**

##### **Cambio climático futuro**

**B.1** Las continuas emisiones de gases de efecto invernadero conducirán a un aumento del calentamiento global; la mejor estimación es que alcanzará 1,5 °C en el corto plazo en los escenarios considerados y las trayectorias modeladas. Cada incremento del calentamiento global intensificará peligros múltiples y simultáneos (nivel de confianza alto). Unas reducciones profundas, rápidas y sostenidas de las emisiones de gases de efecto invernadero conducirían a una desaceleración perceptible del calentamiento global en unas dos décadas, y también a cambios

perceptibles en la composición atmosférica en unos pocos años (nivel de confianza alto) (p. 18).

**B.1.4** Con un mayor calentamiento, se prevé que cada región experimente cada vez más cambios simultáneos y múltiples en los impulsores del impacto climático. Se prevé que las olas de calor y las sequías compuestas serán más frecuentes, incluidos eventos simultáneos en múltiples ubicaciones (nivel de confianza alto). Debido al aumento relativo del nivel del mar, se prevé que los actuales fenómenos extremos del nivel del mar que ocurren 1 cada 100 años ocurran al menos anualmente en más de la mitad de todas las ubicaciones de mareógrafos para el año 2100 en todos los escenarios considerados (nivel de confianza alto). Otros cambios regionales proyectados incluyen la intensificación de ciclones tropicales y/o tormentas extratropicales (confianza media) y aumentos en la aridez y el clima de incendios (confianza media a alta) (p. 19).

### **Impactos del cambio climático y riesgos relacionados con el clima**

**B.2** Para cualquier nivel de calentamiento futuro dado, muchos riesgos relacionados con el clima son mayores que los evaluados en el AR5, y los impactos proyectados a largo plazo son hasta varias veces mayores que los observados actualmente (nivel de confianza alto). Los riesgos y los impactos adversos proyectados y las pérdidas y daños relacionados con el cambio climático aumentan con cada incremento del calentamiento global (confianza muy alta). Los riesgos climáticos y no climáticos interactuarán cada vez más, creando riesgos compuestos y en cascada que son más complejos y difíciles de gestionar (nivel de confianza alto) (p 20).

**B.2.2** Los riesgos y los impactos adversos proyectados y las pérdidas y daños relacionados con el cambio climático aumentarán con cada incremento del calentamiento global (confianza muy alta). Son mayores que en la actualidad para un calentamiento global de 1,5 °C, e incluso mayores para un calentamiento de 2 °C (nivel de confianza alto). En comparación con el AR5, se considera que los niveles de riesgo globales agregados<sup>37</sup> (Motivos de preocupación<sup>38</sup>) van de altos a muy altos a niveles más bajos de calentamiento global debido a la evidencia reciente de los impactos observados, una mejor comprensión de los procesos y nuevos conocimientos sobre la exposición y la vulnerabilidad de los seres humanos y sistemas naturales, incluidos los límites a la adaptación (nivel de confianza alto). Debido al inevitable aumento del nivel del mar (ver también B.3), los riesgos para los ecosistemas costeros, las personas y la infraestructura seguirán aumentando más allá de 2100 (nivel de confianza alto) (p. 21).

### **Probabilidad y riesgos de cambios inevitables, irreversibles o abruptos**

**B.3** Algunos cambios futuros son inevitables y/o irreversibles, pero pueden limitarse mediante una reducción profunda, rápida y sostenida de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. La probabilidad de cambios abruptos y/o irreversibles aumenta con niveles más altos de calentamiento global. De manera similar, la probabilidad de resultados de baja probabilidad asociados con impactos adversos potencialmente muy grandes aumenta con niveles más altos de calentamiento global (p. 24).

**B.3.1** Limitar la temperatura de la superficie global no impide cambios continuos en los componentes del sistema climático que tienen escalas de tiempo de respuesta de varias décadas o más (nivel de confianza alto). El aumento del nivel del mar será inevitable durante siglos o milenios debido al continuo calentamiento profundo de los océanos y al derretimiento de las capas de hielo, y los niveles del mar permanecerán elevados durante miles de años (nivel de confianza alto). Sin

embargo, una reducción profunda, rápida y sostenida de las emisiones de GEI limitaría una mayor aceleración del aumento del nivel del mar y el compromiso proyectado de aumento del nivel del mar a largo plazo. En relación con el período 1995-2014, el probable aumento medio mundial del nivel del mar en el escenario de emisiones de GEI SSP1-1.9 es de 0,15 a 0,23 m para 2050 y de 0,28 a 0,55 m para 2100; mientras que para el escenario de emisiones de GEI SSP5-8,5 es de 0,20 a 0,29 m para 2050 y de 0,63 a 1,01 m para 2100 (confianza media). Durante los próximos 2.000 años, el nivel medio global del mar aumentará entre 2 y 3 m si el calentamiento se limita a 1,5 °C y entre 2 y 6 m si se limita a 2 °C (nivel de confianza bajo) (p. 24).

**B.3.2** La probabilidad y los impactos de cambios abruptos y/o irreversibles en el sistema climático, incluidos los cambios desencadenados cuando se alcanzan puntos de inflexión, aumentan con un mayor calentamiento global (nivel de confianza alto). A medida que aumentan los niveles de calentamiento, también aumentan los riesgos de extinción de especies o pérdida irreversible de biodiversidad en ecosistemas como los bosques (confianza media), los arrecifes de coral (confianza muy alta) y las regiones árticas (confianza alta). Con niveles de calentamiento sostenido entre 2°C y 3°C, las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida occidental se perderán casi por completo e irreversiblemente a lo largo de varios milenios, lo que provocará un aumento de varios metros en el nivel del mar (evidencia limitada). La probabilidad y la tasa de pérdida de masa de hielo aumentan con temperaturas superficiales globales más altas (nivel de confianza alto) (p. 24).

**B.3.3** La probabilidad de resultados de baja probabilidad asociados con impactos potencialmente muy grandes aumenta con niveles más altos de calentamiento global (nivel de confianza alto). Debido a la profunda incertidumbre relacionada con los procesos de la capa de hielo, el nivel medio global del mar aumentará por encima del rango probable: acercándose a 2 m para 2100 y más de 15 m para 2300 en el escenario de emisiones muy altas de GEI (SSP5-8,5) (nivel de confianza bajo). - No puede ser excluido. Existe una confianza media en que la circulación meridional del Atlántico no colapsará abruptamente antes de 2100, pero si ocurriera, muy probablemente causaría cambios abruptos en los patrones climáticos regionales y grandes impactos en los ecosistemas y las actividades humanas (p. 24).

#### **Sobrepaso: exceder un nivel de calentamiento y regresar**

**B.7** Si el calentamiento excede un nivel específico, como 1,5 °C, podría reducirse gradualmente nuevamente logrando y manteniendo emisiones globales netas negativas de CO<sub>2</sub>. Esto requeriría un despliegue adicional de eliminación de dióxido de carbono, en comparación con vías sin exceso, lo que generaría mayores preocupaciones sobre la viabilidad y la sostenibilidad. El exceso implica impactos adversos, algunos irreversibles, y riesgos adicionales para los sistemas humanos y naturales, todos creciendo con la magnitud y duración del exceso (p. 29).

**B.7.2** Cuanto mayor sea la magnitud y la duración del exceso, más ecosistemas y sociedades estarán expuestos a cambios mayores y más generalizados en los impulsores del impacto climático, lo que aumentará los riesgos para muchos sistemas naturales y humanos. En comparación con las vías sin exceso, las sociedades enfrentarían mayores riesgos para la infraestructura, los asentamientos costeros bajos y los medios de vida asociados. Superar los 1,5 °C tendrá como resultado impactos adversos irreversibles en ciertos ecosistemas con baja resiliencia, como los ecosistemas polares, montañosos y costeros, afectados por el

derretimiento de las capas de hielo, el derretimiento de los glaciares o por un aumento acelerado y mayor del nivel del mar (p. 29).

### **Políticas Nacionales Oceánicas y Costeras (2014)**

**Política 1.-** Conservar el patrimonio natural y cultural, los ecosistemas y la diversidad biológica de la zona marina y costera, respetando los derechos de la naturaleza en el Ecuador continental, el Archipiélago de Galápagos, mar territorial, zona contigua, zona económica exclusiva y la Antártida (p. 2).

**Política 3.-** Desarrollar y fomentar la investigación científica y la innovación tecnológica para la sociedad del conocimiento justa y solidaria, en los ámbitos oceánicos y marino-costeros.

**Política 6.-** Promover la inserción estratégica del Ecuador en el Océano Pacífico y en la Antártida (p. 2).

### **Código Orgánico del Ambiente [COA] (2017)**

#### **Libro Preliminar**

#### **Título I**

#### **Objeto, Ámbito y Fines**

**Art. 3.-** Fines. Son fines de este Código:

**4.** Establecer, implementar e incentivar los mecanismos e instrumentos para la conservación, uso sostenible y restauración de los ecosistemas, biodiversidad y sus componentes, patrimonio genético, Patrimonio Forestal Nacional, servicios ambientales, zona marino costera y recursos naturales; (p.11).

#### **Título II**

#### **De los Derechos, Deberes y Principios Ambientales**

**Art.5.-** Derecho de la población a vivir en un ambiente sano. El derecho a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado comprende:

**1.** La conservación, manejo sostenible y recuperación del patrimonio natural, la biodiversidad y todos sus componentes, con respeto a los derechos de la naturaleza y a los derechos colectivos de las comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades;

**2.** El manejo sostenible de los ecosistemas, con especial atención a los ecosistemas frágiles y amenazados tales como páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos, manglares y ecosistemas marinos y marinos-costeros;

**3.** La intangibilidad del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, en los términos establecidos en la Constitución y la ley;

**4.** La conservación, preservación y recuperación de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico;

**5.** La conservación y uso sostenible del suelo que prevenga la erosión, la degradación, la desertificación y permita su restauración;

**6.** La prevención, control y reparación integral de los daños ambientales;

**7.** La obligación de toda obra, proyecto o actividad, en todas sus fases, de sujetarse al procedimiento de evaluación de impacto ambiental;

**8.** El desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías alternativas no contaminantes, renovables, diversificadas y de bajo impacto ambiental;

**9.** El uso, experimentación y el desarrollo de la biotecnología y la comercialización de sus productos, bajo estrictas normas de bioseguridad, con sujeción a las prohibiciones establecidas en la Constitución y demás normativa vigente;

**10.** La participación en el marco de la ley de las personas, comunas, comunidades, pueblos, nacionalidades y colectivos, en toda actividad o decisión que pueda producir o que produzca impactos o daños ambientales;

**11.** La adopción de políticas públicas, medidas administrativas, normativas y jurisdiccionales que garanticen el ejercicio de este derecho; y,

**12.** La implementación de planes, programas, acciones y medidas de adaptación para aumentar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad ambiental, social y económica frente a la variabilidad climática y a los impactos del cambio climático, así como la implementación de los mismos para mitigar sus causas (p.12).

**Art. 7.-** Deberes comunes del Estado y las personas. Son de interés público y por lo tanto deberes del Estado y de todas las personas, comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades y colectivos, los siguientes:

**1.** Respetar los derechos de la naturaleza y utilizar los recursos naturales, los bienes tangibles e intangibles asociados a ellos, de modo racional y sostenible;

**2.** Proteger, conservar y restaurar el patrimonio natural nacional, los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país; **3.** Crear y fortalecer las condiciones para la implementación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático;

**4.** Prevenir, evitar y reparar de forma integral los daños y pasivos ambientales y sociales; e,

**5.** Informar, comunicar o denunciar ante la autoridad competente cualquier actividad contaminante que produzca o pueda producir impactos o daños ambientales (p.13).

## **Libro Primero del Régimen Institucional**

### **Título I**

#### **Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental**

##### **Capítulo I**

##### **Del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental**

**Art. 14.-** Competencia ambiental. El ejercicio de las competencias ambientales comprende las facultades de rectoría, planificación, regulación, control y gestión referidas al patrimonio natural, la biodiversidad, calidad ambiental, cambio climático, zona marina y marino costero, y demás ámbitos relacionados de conformidad con la Constitución y la ley (p.15).

## **Libro Cuarto**

### **Del Cambio Climático**

#### **Título I**

#### **Del Cambio Climático**

##### **Capítulo I**

##### **Disposiciones Generales**

**Art. 247.-** Objeto. El presente libro tiene por objeto establecer el marco legal e institucional para la planificación, articulación, coordinación y monitoreo de las políticas públicas orientadas a diseñar, gestionar y ejecutar a nivel local, regional y nacional, acciones de adaptación y mitigación del cambio climático de manera transversal, oportuna, eficaz, participativa, coordinada y articulada con los instrumentos internacionales ratificados por el Estado y al principio de la responsabilidad común pero diferenciada.

Las políticas nacionales en esta materia serán diseñadas para prevenir y responder a los efectos producidos por el cambio climático y contribuirán a los esfuerzos globales frente a este fenómeno antropogénico (p.65).

**Art. 248.-** Fines. Los fines del Estado en materia de cambio climático serán:

1. Prevenir y evitar la ocurrencia de los daños ambientales y con ello reducir los efectos del cambio climático;
2. Desarrollar programas de educación, investigación, innovación, desarrollo, desagregación y transferencia de tecnología sobre el cambio climático;
3. Reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas del país frente a los efectos del cambio climático;
4. Regular y controlar las acciones y medidas para la adaptación y mitigación del cambio climático;
5. Coordinar, implementar y aplicar la política nacional sobre cambio climático, por parte de las instituciones del Estado y sus diferentes niveles de gobierno en el ámbito de sus competencias;
6. Impulsar el desarrollo sostenible en los modelos de gestión y planificación territorial a nivel local, regional y nacional;
7. Establecer mecanismos para la gestión de riesgos y desastres o emergencias ocasionadas por efectos del cambio climático;
8. Garantizar el acceso oportuno a la información necesaria para gestionar adecuadamente el riesgo a través de medidas de adaptación y mitigación;
9. Fomentar el uso y garantizar el acceso de energías renovables; y,
10. Las demás que se establezcan para el efecto (p.66).

**Art. 249.-** Prioridades en la gestión del cambio climático. Las medidas y acciones para la gestión del cambio climático, considerarán prioritariamente reducir y minimizar las afectaciones causadas a las personas en situación de riesgo, grupos de atención prioritaria y con niveles de pobreza, a la infraestructura, proyectos nacionales y estratégicos, a los sectores productivos, a los ecosistemas y a la biodiversidad.

Para ello se deberán fortalecer las capacidades institucionales, tecnológica y humanas, tanto locales y nacionales (p.66).

## **Capítulo II**

### **Instrumentos para la Gestión del Cambio Climático**

**Art. 250.-** De los instrumentos. La gestión del cambio climático se realizará conforme a la política y la Estrategia Nacional de Cambio Climático, y sus instrumentos que deberán ser dictados y actualizados por la Autoridad Ambiental Nacional (p.66).

**Art. 251.-** Mecanismos de coordinación y articulación. La Autoridad Ambiental Nacional coordinará con las entidades intersectoriales públicas priorizadas para el efecto, y todos los diferentes niveles de gobierno, la formulación e implementación de las políticas y objetivos ante los efectos del cambio climático. Se velará por su incorporación transversal en los programas y proyectos de dichos sectores mediante mecanismos creados para el efecto. Las entidades intersectoriales que sean priorizadas en materia de cambio climático participarán de forma obligatoria y pondrán a disposición de la Autoridad Ambiental Nacional la información que le sea requerida de manera oportuna, de conformidad con los mecanismos que se definan para este fin. Se contará con el apoyo y la participación del sector privado, comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades, colectivos y la ciudadanía en general (p.66).

**Art. 252.-** Planificación territorial y sectorial para el cambio climático. Deberán incorporarse obligatoriamente criterios de mitigación y adaptación al cambio climático en los procesos de planificación, planes, programas, proyectos específicos y estrategias de los diferentes niveles de gobierno y sectores del Estado (p.66).

**Art. 255.-** Transferencia de tecnología. La Autoridad Ambiental Nacional determinará, en coordinación con las entidades competentes, mecanismos e instrumentos que fomenten el desarrollo, innovación, desagregación y transferencia de tecnología, así como la gestión del conocimiento tradicional, colectivo y saber ancestral necesarios para la mitigación y adaptación al cambio climático, y reducción de vulnerabilidad y riesgo (p.67).

## **Título II**

### **Capítulo I**

#### **Disposiciones generales para las medidas de adaptación y mitigación del Cambio Climático**

**Art. 257.-** Enfoques para la adaptación y mitigación. En las acciones de adaptación se crearán y fortalecerán las capacidades del país para afrontar los impactos del cambio climático, con énfasis en la reducción de la vulnerabilidad y de acuerdo a las prioridades establecidas por la Autoridad Ambiental Nacional.

En aquellas zonas vulnerables o de alto riesgo, el Estado priorizará la inversión para la adaptación al cambio climático con especial énfasis en la prevención de desastres.

**Art. 258.-** Criterios para las medidas de adaptación. Para el desarrollo de las medidas de adaptación al cambio climático se tomarán en cuenta los siguientes criterios:

1. Precautelar la calidad de vida de la población y de los ecosistemas;
2. Considerar los escenarios actuales y futuros del cambio climático en los instrumentos de planificación territorial, el desarrollo de infraestructura, el desarrollo de actividades productivas y de servicios, los asentamientos humanos y en la protección de los ecosistemas;
3. Establecer escenarios óptimos y aceptables derivados de los modelos de variabilidad climática actual y futura que deberán incluirse en los planes de desarrollo nacionales y de los Gobiernos Autónomos Descentralizados para garantizar la calidad de vida de la población y la naturaleza; y,
4. Otras que determine la Autoridad Ambiental Nacional.

**Art. 259.-** Criterios de las medidas de mitigación. Para el desarrollo de las medidas de mitigación del cambio climático se tomarán en cuenta los siguientes criterios:

1. Promover patrones de producción y consumo que disminuyan y estabilicen las emisiones de gases de efecto invernadero;
2. Contribuir a mejorar la calidad ambiental para fortalecer la protección y preservación de la biodiversidad, los ecosistemas, la salud humana y asentamientos humanos;
3. Incentivar e impulsar a las empresas del sector público y privado para que reduzcan sus emisiones;
4. Incentivar la implementación de medidas y acciones que permitan evitar la deforestación y degradación de los bosques naturales y degradación de ecosistemas; y,
5. Otras que determine la Autoridad Ambiental Nacional.

**Art. 260.-** De los gases de efecto invernadero. La Autoridad Ambiental Nacional podrá determinar y establecer esquemas de compensación de emisiones de gases de efecto invernadero en el ámbito nacional. Estos esquemas de compensación serán reconocidos por la Autoridad Ambiental Nacional o compatibles con instrumentos ratificados por el Estado y la política nacional de cambio climático.

## Capítulo II

### Medidas mínimas para adaptación y mitigación

**Art. 261.-** De las medidas mínimas. La Autoridad Ambiental Nacional, como ente rector, coordinará con las entidades intersectoriales priorizadas para el efecto y en base a las capacidades locales, lo siguiente:

1. La elaboración y difusión del mapa nacional de vulnerabilidades frente al cambio climático;
2. La definición de los lineamientos y criterios sostenibles para la gestión de cambio climático en los planes de desarrollo y ordenamiento territorial;
3. La identificación de acciones de prevención y control de incendios en los diferentes ecosistemas;
4. La rehabilitación y protección de las zonas vulnerables a inundaciones, sequías, heladas, y degradación del suelo, de acuerdo a la priorización que se dicte para el efecto;
5. El manejo de forma integral de la zona marino costera, así como la promoción de su capacidad adaptativa a los efectos de la variabilidad climática y cambio climático;
6. La cuantificación de la emisión de gases de efecto invernadero, según los sectores priorizados y la promoción de las acciones de mitigación;
7. El diseño y promoción de programas de capacitación, educación, sensibilización y concienciación sobre la gestión del cambio climático considerando los idiomas oficiales de relación intercultural;
8. El impulso a la implementación de acciones preventivas y de control sobre las enfermedades derivadas de los efectos del cambio climático;
9. La promoción y el fomento de programas de eficiencia energética, dentro de toda la cadena, así como el establecimiento de incentivos económicos no económicos de energías renovables convencionales y no convencionales;
10. El fomento de medios de transporte sostenibles y bajos en emisiones de gases de efecto invernadero;
11. La promoción de la restauración de zonas y ecosistemas degradados y afectados e impulso y articulación de medidas que protejan los bosques naturales;
12. La promoción de la reutilización de residuos orgánicos e inorgánicos, así como el aprovechamiento de su potencial energético;
13. El cálculo del factor de emisión de la matriz energética del país; y,
14. Otras que se establezcan en el marco de la coordinación intersectorial.

### Libro Quinto

#### De la Zona Marino Costera

##### Título I

##### Disposiciones Generales

**Art. 262.-** De la regulación y responsabilidad del manejo de la zona marino costera. La Autoridad Ambiental Nacional, en coordinación con los Gobiernos Autónomos Descentralizados en materia de gestión ambiental, regulará las obligaciones especiales aplicables a las actividades públicas o privadas en la zona marino costera, con el fin de lograr la conservación, restauración, protección y aprovechamiento sostenible de los recursos y biodiversidad marina y costera, armonizando las actividades recreativas, comerciales y de producción con los derechos de la naturaleza. Los Gobiernos Autónomos Descentralizados, al elaborar los planes de ordenamiento territorial y los modelos de desarrollo, deberán incorporar en su planificación los lineamientos y criterios ambientales, de conformidad con la planificación nacional del espacio marino costero (p.69).



**Reglamento al Código Orgánico del Ambiente [RCOA] (2019)****Libro Primero****Régimen Institucional****Título I****Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental****Capítulo II****Comités Nacionales Ambientales****Sección 1a****Comité Nacional De Patrimonio Natural**

**Art. 14.-** Atribuciones. - Serán atribuciones específicas del Comité Nacional de Patrimonio Natural:

**d)** Dar seguimiento a la aplicación intersectorial de la Políticas Nacionales Oceánicas y Costeras, el Plan de Ordenamiento del Espacio Marino Costero, la Agenda Intersectorial del Mar, y Plan de Manejo Costero Integrado, en materia ambiental; (p.5).

**Capítulo III****Instrumentos Del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental****Sección 1a****Educación Ambiental**

**Art. 23.-** Enfoques temáticos de la educación ambiental. - Los enfoques temáticos sobre los cuales se desarrollarán las políticas, estrategias, planes, programas y proyectos de educación ambiental, relacionarán al menos con: los sectores estratégicos de biodiversidad y recursos genéticos, calidad ambiental, patrimonio natural, conservación, la gestión y conservación del recurso hídrico y gestión de recursos marino costeros y cambio climático; sin perjuicio de que puedan establecerse otros (p.8).

**Libro Cuarto****Cambio Climático****Título I****Gestión del Cambio Climático****Capítulo IV****Instrumentos para la Gestión del Cambio Climático****Sección 2a.****Plan Nacional de adaptación al Cambio Climático**

**Artículo. 684.-** Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. - El Plan Nacional de Adaptación tiene por objeto identificar y disminuir la vulnerabilidad y el riesgo climático actual y futuro de los sectores priorizados en la Estrategia Nacional de Cambio Climático, a través de la integración de la adaptación al cambio climático en la planificación del desarrollo nacional, sectorial y local.

El Plan establecerá las medidas y acciones de adaptación y los mecanismos e instrumentos de gestión y coordinación que contribuyan a enfrentar los impactos sociales, económicos y ambientales del cambio climático (p.146).

**Capítulo V****Gestión del Cambio Climático a Nivel Sectorial y Local****Sección 2a.****Gestión del Cambio Climático a Nivel Local**

**Art. 698.-** Gestión del cambio climático a nivel local. - Las políticas e instrumentos de planificación y ordenamiento territorial de los Gobiernos Autónomos Descentralizados incorporarán, de forma articulada y coordinada con los demás

niveles de gobierno, criterios de cambio climático conforme a las políticas y normas emitidas por la Autoridad Ambiental Nacional (p.149).

**Art. 699.-** Información mínima. - Las políticas e instrumentos de planificación y ordenamiento territorial de los Gobiernos Autónomos Descentralizados considerarán, conforme a sus competencias, al menos los siguientes elementos:

- a) Información climática, meteorológica e hidrológica validada por el ente rector de meteorología e hidrología;
- b) Áreas expuestas a amenazas climáticas actuales y futuras;
- c) Actividades en el territorio que alteren el sistema climático local;
- d) Actividades generadoras de gases de efecto invernadero de acuerdo a la información contenida en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero;
- e) Información sobre la gestión de riesgos y desastres o emergencias ocasionadas por los efectos del cambio climático; y,
- f) Otras que determine la Autoridad Ambiental Nacional en la norma técnica.

La Autoridad Ambiental Nacional, en coordinación con la entidad rectora de la planificación nacional, emitirá lineamientos para incorporar los criterios de cambio climático en la planificación territorial y brindará herramientas, información y asistencia técnica para la incorporación de estos criterios (p.149).

**Art. 700.-** Seguimiento y evaluación. - La entidad rectora de la planificación nacional remitirá a la Autoridad Ambiental Nacional los informes de cumplimiento de metas de los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial y demás instrumentos de planificación local, a fin de que se pueda evaluar el avance en la implementación de las medidas de mitigación y adaptación (p.149).

## **Capítulo VIII**

### **Gestión de la Información**

#### **Sección 2a.**

#### **Registro Nacional De Cambio Climático**

##### **Título II**

#### **Adaptación y Mitigación del Cambio Climático**

##### **Capítulo I**

#### **Análisis de Riesgo Climático**

**Art. 721.-** Análisis de riesgo climático. - El análisis de riesgo climático actual y futuro es un estudio que permite identificar los potenciales impactos del cambio climático en los sistemas sociales, económicos y ambientales; y que deberá tener en cuenta la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad del sistema en estudio. La vulnerabilidad deberá contemplar como variables la sensibilidad y la capacidad adaptativa.

El riesgo climático actual partirá de la información climática histórica, validada por la autoridad rectora de la información meteorológica e hidrológica, de acuerdo a los lineamientos de la Organización Mundial de Meteorología. El riesgo climático futuro partirá de proyecciones climáticas,

que se generarán con base en los escenarios de cambio climático, así como la información y modelos disponibles validados por la Autoridad Ambiental Nacional. En el caso de estudios en la zona marino costera, se incluirá la información disponible de variables oceánicas históricas y sus proyecciones futuras (p. 154).

**Libro Quinto**  
**Zona Marino Costera**  
**Título II**  
**Planificación Marino Costera**  
**Capítulo I**

**Instrumentos de Planificación para la (sic)**

**Art. 734.-** Políticas nacionales oceánicas y costeras. - Son políticas nacionales oceánicas y costeras:

a) Conservar el patrimonio natural y cultural, los ecosistemas y la diversidad biológica de la zona marina y costera, respetando los derechos de la naturaleza en el Ecuador continental, el archipiélago de Galápagos, el mar territorial, la zona contigua, la zona económica exclusiva y la Antártida.

b) Prevenir, controlar y mitigar la contaminación de los espacios marítimos nacionales y zonas costeras.

c) Desarrollar y fomentar la formación, la investigación científica y la innovación tecnológica para una sociedad del conocimiento justa y solidaria, en los ámbitos oceánicos y marino-costeros.

d) Fomentar las actividades productivas y de prospección para el uso eficiente, inclusivo y sostenible de los recursos de la zona costera, oceánica, alta mar y fondos marinos.

e) Fomentar un sistema integral logístico, de comercialización y transporte marítimo, que se ajuste a la planificación nacional y a las demandas internacionales, y que contribuya a una competitividad sistémica.

f) Promover la inserción estratégica del Ecuador en el Océano Pacífico y en la Antártida.

g) Garantizar la soberanía, los derechos soberanos y la seguridad nacional en el mar, en el marco de la CONVEMAR y otros acuerdos internacionales suscritos en el ámbito oceánico y marino-costero.

h) Reducir la vulnerabilidad y mejorar la adaptación de poblaciones y ecosistemas ante el cambio climático y eventos naturales que afecten a la zona oceánica y marino-costera.

i) Establecer el ordenamiento territorial oceánico y marino costero para articular las diversas intervenciones humanas de manera coherente, complementaria y sostenible.

**Art. 735.-** Concordancia y articulación de la planificación en los niveles territoriales.- Los Gobiernos Autónomos Descentralizados deberán articular sus Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial con los instrumentos de planificación de los demás niveles de gobierno previstos en este capítulo, tomando en cuenta las categorías para el ordenamiento territorial establecidas en el Código Orgánico del Ambiente y los planes de manejo costero integrado y de manejo de la playa de mar y la franja adyacente.

**Capítulo II**  
**Ordenamiento Territorial y Manejo Costero Integrado**  
**Título IV**

**Riesgos Originados por Eventos Naturales**

**Art. 766.-** Categorización de riesgos originados por eventos naturales en la zona costera. - La Autoridad Nacional de Riesgos elaborará la categorización de riesgos originados por eventos naturales y antrópicos en la zona costera. Esta categorización incluirá la restricción de actividades en función de las categorías creadas. La Autoridad Nacional de Riesgos solicitará a la Autoridad Ambiental

Nacional el criterio técnico, en el ámbito de su competencia, sobre prevención de riesgos originados por eventos naturales, y sobre la categorización de las diversas partes de la zona costera. Dicho criterio técnico considerará factores como tipo de ecosistema, resiliencia y representatividad de las especies. La Autoridad Nacional de Riesgos elaborará los protocolos de acción frente a los riesgos naturales y antrópicos que enfrenta la zona costera, como sismos, deslizamientos de tierra, inundaciones, intrusión salina y tsunamis.

**Art. 767.-** Titulares de derechos en zonas de riesgo. - Cuando la Autoridad Nacional de Gestión de Riesgos identifique titulares de derechos reales dentro de zonas de riesgo crítico, acorde su categorización de riesgos, desarrollará coordinadamente con los gobiernos autónomos descentralizados municipales, un plan de reubicación o de actuación para protección o recuperación de dicha zona.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Enfoque de la investigación

El enfoque de la presente investigación es mixto, ya que integra tanto métodos cuantitativos como cualitativos en base a las variables climatológicas y oceanográficas en estudio con la finalidad de ofrecer una visión más holística del problema de investigación en cuestión.

##### 3.1.1 Tipo y alcance de investigación

Es una investigación aplicada correlacional, considerando que no solo se aplicaron conocimientos teóricos, sino también se determinó la relación entre las 8 variables en un rango de  $|-0.7 < -1|$ . Al analizar la relación entre estas variables, la investigación permitió identificar patrones y tendencia que resulten útiles para la prevención de algún tipo de desastre a futuro.

##### 3.1.2 Diseño de investigación

La investigación en cuestión no es experimental, puesto que se analizaron datos de temperatura superficial del mar (TSM), nivel del mar (MSL), salinidad de la superficie del mar (SSS), dirección y viento de la superficie del mar (SSW) obtenidos del Copernicus Climate Change Service (C3S) del Programa de la Observación de la Tierra de la Unión. Adicionalmente, para determinar la variabilidad climática se evaluaron datos como precipitación, temperatura del aire, presión atmosférica, dirección/velocidad del viento y humedad relativa, los cuales son extraídos del Copernicus Marine Service del Programa de la Observación de la Tierra de la Unión. Estas observaciones multisatélite se realizaron en el lapso de tiempo de 1993 - 2023 para su posterior procesamiento, con la finalidad de identificar cómo influyen las variables antes mencionadas en la elevación del nivel del mar.

#### 3.2 Metodología

##### 3.2.1 Variables

###### 3.2.1.1. Variable independiente.

- Tiempo (años)
- Área de estudio (Ensenada Guayaquil, Antártica)

###### 3.2.1.2. Variable dependiente.

- Temperatura superficial del mar (°C)
- Salinidad (PSU)

- Viento (m/s)
- Precipitación (mm)
- Temperatura del aire (°C)
- Humedad relativa (%)
- Presión atmosférica (hPa)
- Nivel Medio del Mar (m)
- Variabilidad climática

### 3.2.2. Matriz de operacionalización de variables

La matriz de operacionalización se encarga de definir cómo las variables independientes y dependientes se midieron dentro del marco de la investigación.

**Tabla 1.**

#### ***Variables independientes***

<b>Variables</b>	<b>Tipo</b>	<b>Nivel de medida</b>	<b>Descripción</b>
Tiempo (años)	Cuantitativa	Discreta	Período temporal medido en años desde un punto de referencia.
Área de estudio	Categórica	Nominal	Región geográfica específica bajo investigación (Ensenada Guayaquil, Antártica).

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Tabla 2.**

#### ***Variables dependientes***

<b>Variables</b>	<b>Tipo</b>	<b>Nivel de medida</b>	<b>Descripción</b>
Temperatura Superficial del Mar	Cuantitativa	Continua	Medición de la temperatura en °C en la superficie del mar.
Salinidad	Cuantitativa	Continua	Concentración de sal en el agua de mar medida en PSU.
Viento de la Superficie del mar	Cuantitativa continua	Continua	Velocidad del viento sobre en metros por segundo.
Precipitación	Cuantitativa	Continua	Cantidad de precipitación medida en milímetros por día.
Temperatura	Cuantitativa	Continua	Medición de la temperatura del aire en °C.
Humedad	Cuantitativa	Continua	Porcentaje de humedad relativa en el aire.
Presión atmosférica	Cuantitativa	Continua	Medición de la presión ejercida por la atmósfera en hectopascales.
Nivel Medio del Mar	Cuantitativa	Continua	Altura promedio del nivel del mar en metros respecto a un datum geodésico.
Variabilidad Climática	Cualitativa	Ordinal	Grado de cambio o fluctuación en los parámetros climáticos (bajo, medio y alto).

**Elaborado por: La Autora, 2025**

### 3.2.3. Recolección de datos

#### 3.2.3.1. Recursos.

Estos recursos han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación, puesto que permiten una revisión exhaustiva y análisis de una variedad de recursos bibliográficos, asimismo las herramientas y softwares facilitan diversas etapas de la elaboración del proyecto. En el **Anexo N° 4, Figura 46** se observan los recursos que se emplearán en el proyecto.

#### 3.2.3.2. Métodos y técnicas.

Los métodos y técnicas propuestos permitieron cumplir con el análisis del estudio al proporcionar un enfoque integral y sistemático para evaluar las variables climatológicas, a través de la recolección y procesamiento preciso de datos, análisis exploratorio detallado, modelado avanzado (modelos de series temporales y espaciales), así como la validación rigurosa y visualización efectiva de resultados, esto conllevará a entender las relaciones entre estas variables en cuanto a su variabilidad temporal (**Figura 2**).

**Figura 2.**

**Diagrama de métodos y técnicas para evaluar las variables de estudio**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

#### 3.2.3.2.1. Georreferenciación del área de estudio.

En cuanto a la delimitación del área de estudio, se procedió a descargar una imagen satelital de la Ensenada Guayaquil en la Antártica del software Google Earth Pro. Además, se extraerán sus respectivas coordenadas UTM Datum WGS-84 zona 21S en una hoja de Excel (**Ver Anexo N° 3, Tabla 9**).

Por otra parte, el software QGIS 3.40.0 'Prizren', con Licencia Pública General GNU (GPL), permitió posicionar la imagen correctamente en el espacio geográfico dentro de QGIS. Al cargar la imagen y añadir los puntos de control (Hoja CSV), se asociaron las ubicaciones específicas de la imagen con sus coordenadas geográficas exactas. Una vez la imagen georreferenciada, puedes crear capas adicionales, digitalizar características importantes y realizar análisis detallados.

### **3.2.3.2.2. Recopilación de datos satelitales.**

El conjunto de datos de imágenes satelitales abarca desde 1993 hasta 2023, permitiendo indagar la influencia de la salinidad, temperatura y viento superficial del mar en las variaciones del nivel del mar en la Ensenada Guayaquil, Antártica (**Tabla 3**). La recopilación de estos datos es fundamental para comprender las dinámicas oceánicas en esta región crítica, proporcionando una base sólida para el análisis de cómo estos factores interactúan y afectan al nivel del mar.

La recopilación y el procesamiento de imágenes satelitales durante tres décadas proporcionan un registro detallado que puede ayudar a predecir futuros cambios y a desarrollar estrategias de mitigación o adaptación para las comunidades y ecosistemas afectados por las variaciones del nivel del mar.

**Tabla 3.**

#### **Datos a utilizar en el estudio**

	<b>Parámetro</b>	<b>Fuente</b>	<b>Uso en este estudio</b>
Datos satelitales	TSM	OSTIA	Análisis
	MSL	CMEMS	Análisis
	SSS	CMEMS	Análisis
	SSW	ERA-5	Análisis
	Precipitación	ERA-5	Análisis
	Temperatura del aire	ERA-5	Análisis
	Humedad Relativa	ERA-5	Análisis
	Presión atmosférica	ERA-5	Análisis

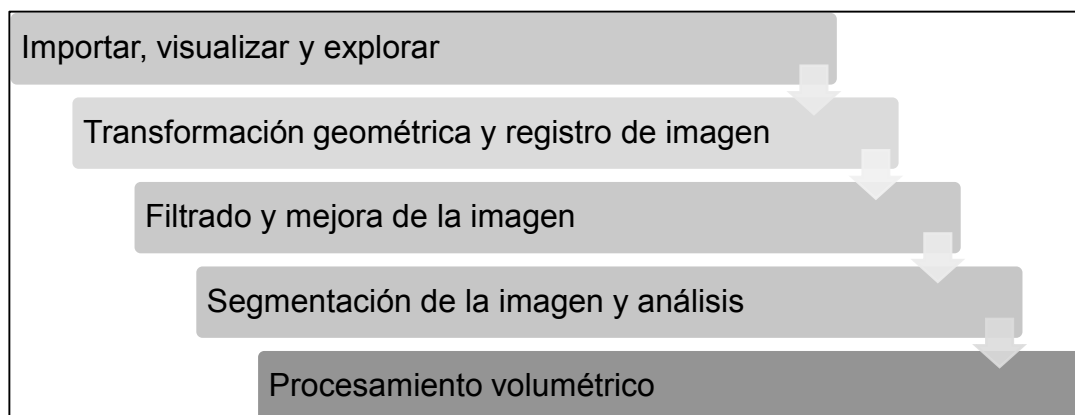
**Nota. Los datos mensuales corresponden al período 1993 - 2023**

**Fuente: Kim et al. (2023). Elaborado por: La Autora, 2025**

### **3.2.3.2.3. Procesamiento de imágenes satelitales**

Es el conjunto de técnicas utilizadas para interpretar analizar datos capturados por satélites en órbita de la Tierra. Estas imágenes proporcionan una vista detallada de la superficie terrestre, permitiendo estudiar cambios ambientales, urbanización, agricultura y muchos otros fenómenos (**Figura 3**).



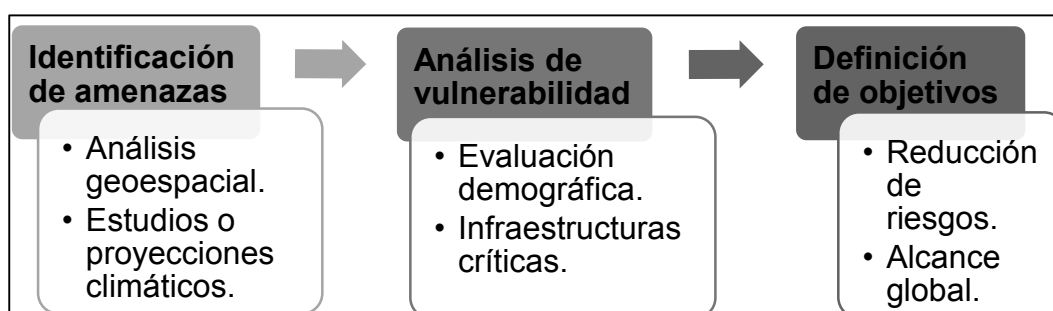
**Figura 3.*****Etapas de procesamiento de imágenes satelitales***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

***3.2.3.2.4. Diseño del sistema de alerta temprana.***

- Evaluación de necesidades y definición de objetivos.

La primera etapa consiste en identificar y analizar los riesgos y amenazas potenciales que se pretenden monitorear. Esto implica comprender el contexto específico, determinar la naturaleza y magnitud de los peligros, y evaluar la capacidad de manejarlos (**Figura 4**). A partir de esta evaluación, se establecen los objetivos específicos que el sistema de alerta temprana debe alcanzar, como la reducción de daños, la protección de vidas humanas y la mejora de la preparación/respuesta ante emergencias.

**Figura 4.*****Fases de intervención en la primera etapa del SAT***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

- Diseño del sistema de detección y monitoreo.

Se basa en la selección de tecnologías y métodos para identificar y seguir de cerca posibles amenazas. Estos incluyen la instalación de sensores, satélites, estaciones meteorológicas y otros dispositivos de observación que recopilan datos

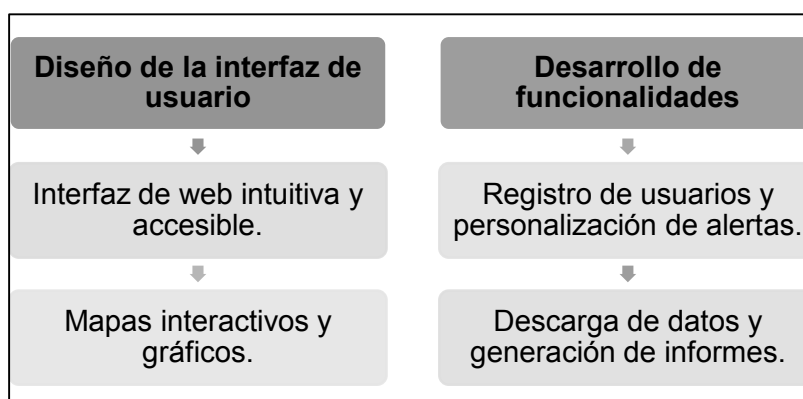
en tiempo real sobre diversos riesgos. Además, se desarrollan algoritmos y modelos para analizar estos datos y detectar patrones o señales de alerta.

- Desarrollo de la plataforma web.

La implementación de sistemas de alerta temprana emerge como una solución interdisciplinaria que ofrece una gran oportunidad para reducir el impacto de fenómenos hidrometeorológicos, disminuyendo la pérdida de vidas humanas (**Figura 5**). En los últimos años, las páginas web se han optimizado y ganado importancia, integrándose en grandes contextos resaltando su relevancia.

**Figura 5.**

***Fases de intervención en la tercera etapa del SAT***



**Elaborado por: La Autora, 2025**

- Establecimiento de protocolos de comunicación.

En esta etapa se definen los métodos y canales de comunicación (plataformas web, correos electrónicos, mensajes de texto y aplicaciones móviles) que se utilizarán para transmitir información crítica de manera rápida y eficaz. Esto incluye la identificación de los actores clave, como autoridades, comunidades y organizaciones, así como la creación de procedimientos claros para la emisión de alertas, la coordinación de respuestas y la retroalimentación. Por otra parte, los protocolos aseguran que la información llegue a las personas adecuadas en el momento oportuno, de tal manera que se minimicen confusiones y a la vez se mejore la eficacia del sistema en situaciones de emergencia.

- Desarrollo de planes de respuesta y capacitación.

Son estrategias y procedimientos claros para actuar ante la activación de una alerta. Esto implica definir roles y responsabilidades de las autoridades, comunidades y organizaciones, con la finalidad de establecer acciones específicas para diferentes escenarios de emergencia. Adicionalmente, incluye la capacitación

continúa de todos los involucrados mediante simulacros, talleres y programas educativos, para asegurar que todos estén preparados y sepan cómo reaccionar eficazmente ante desastres, precautelando su vida.

- Implementación y pruebas del SAT.

Se incluye la integración de sensores, sistemas de comunicación, plataformas de análisis de datos y protocolos de respuesta. Una vez implementado, el sistema debe someterse a pruebas exhaustivas y simulacros para evaluar su eficacia, precisión y rapidez en la detección y notificación de amenazas. Las pruebas piloto permiten identificar y corregir fallos, asegurando que el SAT funcione de manera óptima y esté listo para operar en situaciones reales de emergencia.

- Monitoreo y mantenimiento.

Se debe realizar la supervisión continua del funcionamiento del sistema y la aplicación de tareas regulares de mantenimiento para asegurar su operatividad y fiabilidad. Esto incluye la revisión periódica de los sensores, la actualización de software y algoritmos, además de la evaluación constante de los protocolos de comunicación y respuesta. Por último, implica la recopilación y análisis de datos de rendimiento para identificar áreas de mejora y garantizar que el sistema siga siendo efectivo ante nuevas amenazas.

### **3.2.4 Análisis estadístico**

#### **3.2.4.1. Estadística inferencial.**

##### **3.2.4.1.1. Matriz de correlación.**

La matriz de correlación presenta los valores de correlación, por defecto se empleó la de Pearson en vista de que las variables no mantenían una distribución normal, la cual permitió evaluar el grado de relación lineal entre cada uno de los elementos o variables. El resultado de esta correlación varía entre -1 y 1, indicando la fuerza y dirección de la relación, como se visualiza en la **Tabla 4**.

**Tabla 4.**

#### ***Coefficientes de correlación***

<b>Valor <math>r_s</math></b>	<b>Fuerza de la correlación</b>
$\pm 0.0 < \pm 0.1$	no hay correlación
$\pm 0.1 < \pm 0.3$	poca correlación
$\pm 0.3 < \pm 0.5$	correlación media
$\pm 0.5 < \pm 0.7$	correlación alta
$\pm 0.7 < \pm 1$	correlación muy alta

**Fuente: Kuckartz et al. (2013)**

Un coeficiente entre -1 y 0 indica una correlación negativa, lo que significa una relación inversa entre las variables. Por otra parte, un coeficiente entre 0 y 1 denota una correlación positiva, es decir, una relación directa entre las variables. Finalmente, un coeficiente de 0 significa que no existe correlación.

#### **3.2.4.1.2. Modelo de regresión lineal múltiple.**

Se basa en el análisis de las relaciones lineales entre tres o más variables simultáneamente.

- **Fórmula:**

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1} \beta_i x_i + \epsilon_i$$

y: variable dependiente

$x_1, x_2, \dots, x_p$ : variables independientes

$\beta_0$ : Intercepto (y cuando  $x=0$ )

$\beta_i$ : coeficiente mide el efecto de la variable  $x_i$  sobre y

$\epsilon$ : término de error (residuo)

- **Casualidad  $\neq$  correlación:** una variable no puede causar cambios en otra.
- **Multicolinealidad:** surge cuando dos variables se encuentran altamente correlacionadas, pueden afectar en los resultados. Por lo tanto, el modelo predictor elimina una de las variables.
- **Predicción y margen de error:** estimación de valores futuros a comparación de los resultados reales.

#### **3.2.4.2. Análisis de series temporales.**

En el contexto de las variables atmosféricas y oceánicas, permite comprender las tendencias, patrones estacionales y ciclos en los datos.

##### **3.2.4.2.1. Transformada de Fourier**

- **Fórmula:**

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i u x} dx$$

$F(u)$ : transformada de Fourier de  $f(t)$

u: frecuencia angular (radianes por segundo)

i: unidad imaginaria ( $i^2 = -1$ )

x: variable del tiempo

$e^{-2\pi i u x}$ : núcleo complejo de la transformada

- **Series temporales:** visualizar las series temporales utilizando gráficos de línea para identificar tendencias y patrones estacionales.
- **Componente de tendencia:** comportamiento a largo plazo de la variable y preparación de la serie temporal.
- **Componente estacional:** reflejo de los patrones cíclicos regulares que ocurren cada cierto tiempo (estación).
- **Componente aleatoria:** separación de la tendencia y estacionalidad, representa la variabilidad no explicada.
- **Componente centrada:** eliminación de la media de la serie original para un mejor análisis exhaustivo.
- **Espectro de frecuencias:** determinación de frecuencias dominantes de las variaciones periódicas cíclicas.
- **Espectro completo:** períodos (meses) dominantes de acuerdo a sus magnitudes.

#### **3.2.4.3. Análisis espacial.**

En el caso de las variables atmosféricas y oceánicas, permite entender cómo estas variables se encuentran distribuidas en el espacio e interactúan entre sí.

##### **3.2.4.3.1. Red neuronal (*Machine learning*).**

- **Interpolación espacial:** permite estimar valores en ubicaciones no muestreadas.
- **Regresión espacial:** modela las relaciones entre variables dependientes e independientes teniendo en cuenta la auto correlación espacial.
- **Análisis de clústeres espaciales:** identifica agrupamientos y patrones espaciales.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Compilación de imágenes satelitales del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) respecto a la TSM, MSL, SSS, SSW y del Centro de Servicios de Información y Datos de Ciencias de la Tierra Goddard (DISCO GES) en cuanto a la precipitación, temperatura del aire, humedad y presión atmosférica de la Ensenada Guayaquil Antártica

#### 4.1.1 Variables Atmosféricas

##### 4.1.1.1. Precipitación.

El valor estándar que se refleja de precipitación desde 1993 hasta 2023, es de 79.46 mm/día (**Ver Anexo N° 5, Tabla 10**). En vista, de que se presentaron sistemas de baja presión que influenciaron en la actividad ciclónica del océano circumpolar, lo que facilitó el ingreso de vientos cálidos y húmedos hacia la región Antártica. Por otra parte, en el año 2000 se reflejó una precipitación media mínima de 58.23 mm/día. En el transcurso de este año, existieron sistemas de alta presión que limitaron el ingreso de sistemas de baja presión, ocasionando un clima más seco en comparación con años previos. Además, El Niño produjo cambios en las condiciones climáticas del área de estudio, provocando temperaturas cálidas y alteraciones en los patrones del viento. No obstante, se evidenciaron episodios aislados de tormentas y frentes cálidos procedentes del océano circumpolar que forjaron lluvias esporádicas, lo cual es evidente en el año 2010 con un valor máximo de 93.82 mm/día, lo cual contribuyó al origen de fuertes precipitaciones.

##### 4.1.1.2. Temperatura del aire.

El valor promedio que señala de temperatura de 1993 al 2023 es de -1.13 °C, lo cual representa una tendencia hacia temperaturas cálidas (**Ver Anexo N° 5, Tabla 11**). En comparación con el año 1995, se mantenían temperaturas por debajo de los -2.42 °C esto facilitó la acumulación y compactación de la nieve, transformándola en hielo glaciar, lo que resulta ser esencial para la estabilidad de la capa de hielo antártica. No obstante, con el paso del tiempo se han evidenciado calores inusuales en la región produciendo temperaturas máximas de hasta -0.17 °C. En el período del 2022, se presencié un fenómeno meteorológico denominado como “ríos atmosféricos”, que son columnas de aire caliente y húmedo que se desplazan desde Australia hacia la Antártida. Este fenómeno provocó aumentos drásticos en temperaturas locales, contribuyendo a condiciones cálidas y deshielo

acelerado, las cuales se vuelven más frecuentes por la emisión de gases de efecto invernadero.

#### **4.1.1.3. Presión atmosférica.**

El valor promedio que se evidencia de presión atmosférica a lo largo del período 1993 – 2023 es de 990.08 hPa (**Ver Anexo N° 5, Tabla 12**). En vista de que se presentaron fenómenos climáticos extremos en la región, como en el caso de las olas oceánicas y cambios abruptos en las condiciones meteorológicas. Estos eventos son indicativos del estrés climático creciente en la Antártida y ocasionan efectos significativos en la estabilidad de las plataformas de hielo. Durante el año 2000, la presencia del fenómeno El Niño produjo cambios en las condiciones climáticas de la región Antártica, provocando temperaturas cálidas y alteraciones en los patrones de viento dando como resultado sistemas moderados de alta presión de 994.36 hPa. A pesar de ello, en el 2015 se manifestó una presión atmosférica mínima pero no extrema de 987.36 hPa como consecuencia de la presencia de sistemas de baja presión. Estos a su vez, generaron vientos fuertes y cambios bruscos en la presión atmosférica, lo que es particular del clima antártico.

#### **4.1.1.4. Velocidad y dirección del viento.**

El valor promedio registrado de velocidad del viento desde 1993 hasta 2023 es de 7.67 m/s, puesto que durante los primeros meses de cada año se reflejaron temperaturas del aire de 2.17 °C a 2.62 °C (**Ver Anexo N° 5, Tabla 13**). A partir del 2006 se reflejó un aumento de más de 0.7 °C en la Antártida por década, debido a la combinación de gases de efecto invernadero y variaciones naturales en el clima. Por otra parte, en el 2007 se detectó una velocidad del viento mínima de 7.07 m/s dando como resultado vientos moderados. A diferencia de ello, en el 2021 se resaltó una velocidad del viento máxima de 8.41 m/s, dado que se produjeron modificaciones en la presión atmosférica y cambios en los patrones de viento que influenciaron en las condiciones climáticas locales. Sin embargo, a finales del mes de agosto la extensión del hielo marino fue la quinta más grande en la historia alcanzando 18.75 millones de km<sup>2</sup>, conjuntamente a partir del mes de octubre comenzó a disminuir drásticamente.

#### **4.1.1.5. Humedad relativa.**

El valor estándar que se refleja de humedad relativa entre los años 1993 y 2023 es del 90.58%, esto a su vez repercutió en el aumento de la tendencia del deshielo debido a las altas temperaturas (**Ver Anexo N° 5, Tabla 14**). Además, las

variaciones en los patrones del viento y presión atmosférica influyeron en las condiciones climáticas locales conllevando a un incremento de temperatura del aire alrededor de los 0.53 °C, permitiendo una mayor retención de humedad en la atmósfera. Durante el período anual del 2000, se evidenció una humedad relativa no tan mínima del 88.44% lo que representa condiciones húmedas o áreas de deshielos frecuentes. La disminución de la capa de ozono ha permitido un mayor ingreso de radiación solar, lo cual calienta el aire y simultáneamente, produce un aumento de la humedad relativa en zonas susceptibles como la Antártica. En el año 2011 se alcanzó una humedad relativa máxima del 92%, en vista de que se reportaron eventos de calor inusuales en la región produciendo temperaturas de 0.87 °C a 1.95 °C. Adicionalmente, existió un incremento de las temperaturas del agua subglacial, lo que produce una mayor saturación y formación de niebla dentro del área de estudio.

#### **4.1.2 Variables oceanográficas**

##### **4.1.2.1. Temperatura superficial del mar.**

El valor promedio de temperatura superficial del mar en el período 1993 – 2023 es de -0.18 °C, esto indica que el agua está ligeramente por debajo del punto de congelación como resultado de la existencia de patrones de vientos catabáticos que llevaron aire frío desde el interior del continente hacia las costas, lo que contribuyó en que ciertos períodos mantengan temperaturas bajas en el océano circundante, como en el caso del año 2016 con una temperatura mínima de -0.49 °C (**Ver Anexo N° 5, Tabla 15**). Sin embargo, se presencié un mayor retroceso de las plataformas de hielo y glaciares a un ritmo acelerado debido a las altas temperaturas del aire y corrientes oceánicas más tibias. En contraste al año 2022, se mostró una temperatura máxima superficial del mar de 0.25 °C siendo su causa principal el surgimiento de los denominados “ríos atmosféricos”, que son columnas de aire caliente y húmedo que se desplazan desde Australia hacia la Antártida. Este fenómeno conllevó a aumentos drásticos en temperaturas locales, contribuyendo a condiciones cálidas y deshielo acelerado, las cuales se vuelven más frecuentes por la emisión de gases de efecto invernadero.

##### **4.1.2.2. Salinidad.**

El promedio estimado de salinidad entre los años 1993 y 2023 es de 33.94 PSU, lo que significa que es relativamente alta para el área de estudio, ya que influye en el punto de congelación del agua (**Ver Anexo N° 5, Tabla 16**). Esto a su



vez, se encuentra relacionado con el incremento de temperaturas del agua subglacial, afectando directamente en la estabilidad de las plataformas de hielo. Durante el año 2006, se reflejó un grado de salinidad inferior de 33.75 PSU en relación a los años estudiados. A pesar de ello, se tasó una pérdida de hielo con un acrecentamiento del 75% en los últimos diez años, con la desaparición de un volumen significativo de hielo anualmente. En lo que respecta al año 2023, se detectaron alteraciones en la presión atmosférica y cambios en los patrones de viento, los cuales influenciaron en las condiciones climáticas locales dando un valor máximo de salinidad de 34.22 PSU, esto indica que la concentración de sales disueltas en el agua del mar es bastante elevada. Adicionalmente, esto implica que, al existir un nivel de salinidad alto, el agua se mantenga en estado líquido con temperaturas muy bajas, dando como resultado el impedimento de que se congelen a temperaturas superiores.

#### **4.1.2.3. Nivel del mar.**

La media calculada del nivel del mar a lo largo del período 1993 – 2023 es de -2.46 m (**Ver Anexo N° 5, Tabla 17**), esto señala que se encuentra por debajo de la altitud del mar debido a la creciente pérdida de hielo en los últimos años, ocasionando la desaparición de un volumen significativo de hielo anualmente. Esto apunta a que se origine un rebote isostático, que consiste en la elevación de las masas de la corteza terrestre luego de la pérdida de peso del hielo. Por lo general, ocurre cuando existen cambios abruptos en las condiciones meteorológicas; uno de los fenómenos más acontecidos son los denominados como “ríos atmosféricos”, que son columnas de aire caliente y húmedo que se desplazan desde Australia hacia la Antártida. A partir de 1993 hasta 1999 se mantenía un nivel del mar ligeramente moderado alrededor de los -1.62 m, lo cual produjo cambios en la dinámica de las corrientes oceánicas como consecuencia de la variabilidad en la circulación atmosférica ejercida por la baja presión del mar de Amundsen-Bellingshausen. En relación al año 2023, el nivel del mar se encontraba muy por debajo del nivel medio del mar indicando un valor mínimo de -3.34 m. Es importante señalar que a medida que el hielo de la Antártida se derrite contribuye al aumento del nivel del mar global.

## 4.2 Aplicación de una matriz de correlación de múltiples variables para evaluar la relación entre las series temporales de variables climáticas y oceánicas con los cambios en el nivel del mar.

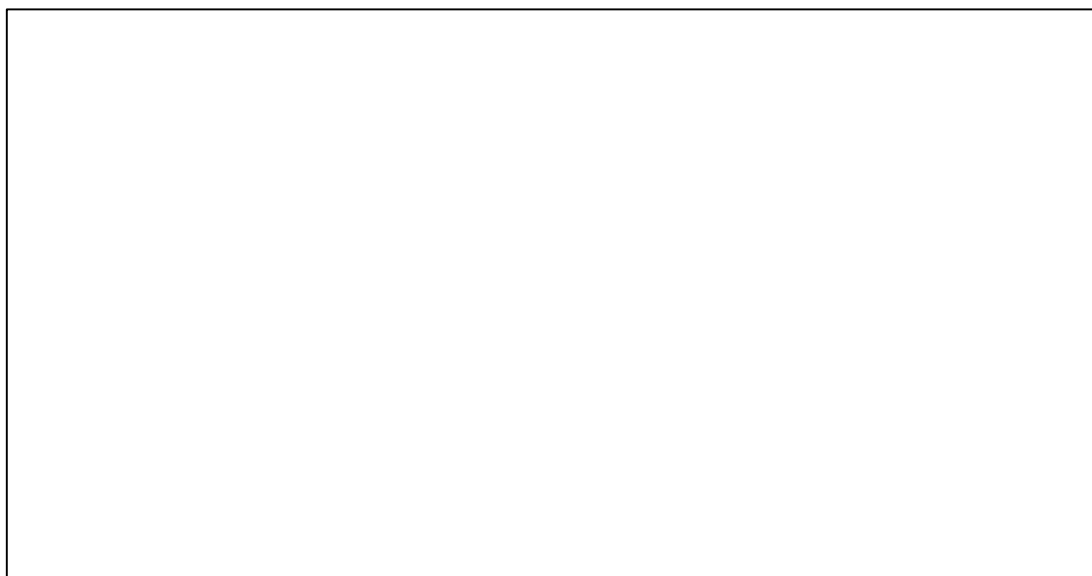
### 4.2.1 Modelo de regresión lineal múltiple

#### 4.2.1.1. Análisis de correlación entre las variables atmosféricas y oceanográficas que forman el modelo.

En primera instancia, para la elaboración de la matriz de análisis de multivariable se utilizó el software RStudio a través de la ejecución de comandos de programación como “psych” (análisis psicométricos y estadística descriptiva) y “ggplot2” (cálculo de coeficiente de correlación entre variables), con la finalidad de determinar el grado de correlación lineal entre las variables atmosféricas y oceanográficas. En cuanto al tipo de coeficiente de correlación que se aplicó es el de “Pearson”, dado que las variables mantienen una distribución normal. Además, los histogramas permiten comprender la dispersión y normalidad de cada variable individualmente, lo cual es esencial para la interpretación de correlaciones. Respecto a las variables atmosféricas se representan de la siguiente manera precipitación (mm/día), temperatura del aire (°C), presión atmosférica (hPa), velocidad del viento (m/s), humedad relativa (%). En cambio, las variables oceanográficas como temperatura superficial del mar (°C), salinidad (PSU) y nivel del mar (m), como se observa en la **Figura 6**.

#### **Figura 6.**

#### ***Matriz de correlación entre las variables atmosféricas y oceanográficas***



**Elaborado por: La Autora, 2025**

De acuerdo a la **Figura 6**, las gráficas de dispersión con puntos negros y rojos, permiten visualizar las tendencias y relaciones no lineales entre variables. En contraste con los resultados previos, la temperatura del mar mantiene en mayor medida una correlación positiva fuerte de 0.80 en cuanto a la temperatura del aire. Asimismo, la humedad relativa y precipitación revelaron una correlación levemente positiva de 0.29. A su vez, la precipitación y velocidad del viento presentaron una correlación positiva de 0.22. En cambio, la salinidad y temperatura del mar reflejaron una correlación positiva baja de 0.16. Del mismo modo, la salinidad y temperatura del aire mostraron una correlación positiva débil entre sí de 0.11.

Además, la temperatura superficial del mar y velocidad del viento revelaron una correlación negativa de -0.43. De la misma forma, la presión atmosférica demostró una correlación negativa referente a la precipitación de -0.41. Al igual que, la velocidad del viento y temperatura del aire presentaron una correlación negativa de -0.27. La humedad relativa y temperatura del mar mantienen una correlación débil negativa de -0.15. Simultáneamente, la temperatura del aire y humedad relativa revelaron una correlación negativa ligeramente débil de -0.10. No obstante, la presión atmosférica mantuvo una correlación negativa leve, en el caso de la temperatura del aire, así como la salinidad (-0.15) y temperatura superficial del mar (-0.11)

Por otra parte, las variables que mantuvieron correlación negativa moderada en relación al nivel del mar son salinidad (-0.24), precipitación y humedad relativa (-0.21). Esto a su vez, indica que cuando estas variables aumentan conllevan a una disminución del nivel del mar esto podría depender de la variabilidad climática al causar sequías prolongadas y cambios en los patrones de precipitación, lo que conduce a una reducción en la cantidad de agua que fluye en la Ensenada Guayaquil Antártica. Adicionalmente, en condiciones de calor intenso, la evaporación se incrementa, lo que implica que la mayor parte del agua se transforma en vapor y son desprendidos de los cuerpos de agua. Del mismo modo, las corrientes oceánicas poseen influencia en la reasignación de agua a nivel global, esto podría ocasionar una reducción temporal del nivel del mar en algunas zonas.

Por último, en cuanto a las 2 temporadas que forman parte de la Antártica verano (octubre a marzo) e invierno (abril a septiembre) se determinó una correlación positiva débil con las siguientes variables: presión atmosférica (0.35),

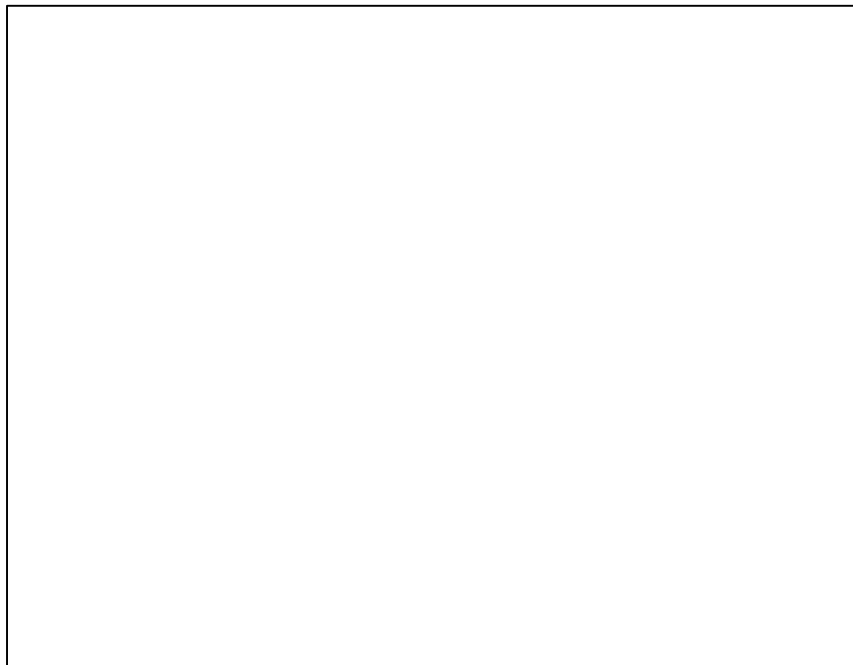
velocidad del viento (0.34), humedad relativa (0.18), precipitación (0.12). Por el contrario, las variables que mantuvieron una correlación negativa moderada en relación a las temporadas tanto la temperatura del aire como la temperatura superficial del mar (- 0.58) y salinidad (-0.24).

#### **4.2.1.1.1. Multicolinealidad.**

Es evidente que existe una fuerte correlación entre la temperatura superficial del mar y temperatura del aire de 0.80, ya que ambas influyen fuertemente en el intercambio térmico océano-atmósfera (**Figura 7**).

**Figura 7.**

***Diagrama de dispersión entre la temperatura del aire y temperatura superficial del mar***



**Elaborado por: La Autora, 2025**

Dado este caso, se prefiere mantener el dato de la temperatura del mar, y así evitar una redundancia entre las variables predictoras, en vista de que presentan una colinealidad y esto puede repercutir negativamente en el modelo de regresión (**Figura 8**).

**Figura 8.*****Mapa de calor de la matriz de correlación***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**4.2.1.1.2. Generación del modelo.**

En cuanto a la generación del modelo, en este caso se empleó el método mixto, el cual inicia incluyendo todas las variables, dando como resultado (**Tabla 5**) lo siguiente:

- Intercept (32.11) indica el valor del nivel del mar cuando las otras variables son 0.
- Mes (0.0518) cada mes que transcurre, el nivel del mar aumente en 0.0518 unidades, código de significancia es muy significativo ( $p < 0.001$ ).
- Temporada (0.0832) no es significativo ( $p = 0.41$ ), no tiene un efecto relevante en el nivel del mar.
- Precipitación (-0.0034) efecto leve negativo en el nivel del mar, código de significancia es casi significativo ( $p \approx 0.005$ ).
- Temperatura del aire (-0.0132) no es significativo ( $p = 0.59$ ), no tiene un efecto relevante en el nivel del mar.
- Presión atmosférica (-0.0020) no es significativo ( $p = 0.79$ ), no tiene un efecto relevante en el nivel del mar.
- Velocidad del viento (-0.0045) no es significativo ( $p = 0.89$ ), no tiene un efecto relevante en el nivel del mar.

- Humedad relativa (-0.0406) al encontrarse elevada conduce a disminuir el nivel del mar, código de significancia es significativo ( $p < 0.05$ ).
- Temperatura superficial del mar (0.0879) no es significativo ( $p = 0.22$ ), no tiene un efecto relevante en el nivel del mar.
- Salinidad (-0.9746) a mayor salinidad el nivel del mar disminuye severamente, código de significancia es muy significativo ( $p < 0.001$ ).

**Tabla 5.*****Inspección del modelo inicial de regresión***

	<b>Estimation</b>	<b>Std.Error</b>	<b>t value</b>	<b>Pr(&gt; t )</b>
(Intercept)	32.110173	10.170613	3.157	0.001727**
Mes	0.051873	0.015505	3.345	0.000907***
Temporada	0.083279	0.105450	0.790	0.430195
Precipitación	- 0.003444	0.001792	-1.922	0.055366
Temperatura del aire	0.013273	0.024933	0.532	0.594803
Presión atmosférica	0.002077	0.008047	0.258	0.796417
Velocidad del viento	-0.004528	0.033843	-0.134	0.893639
Humedad relativa	-0.040611	0.014973	-2.712	0.007000**
Temperatura superficial del mar	0.087997	0.072225	1.218	0.223871
Salinidad	-0.974640	0.190464	-5.117	5.04e-07***

**Nota. Códigos de significancia: 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.**

**Elaborado por: La Autora, 2025**

Este modelo incluye todas las variables introducidas como predictores, conllevando a obtener una  $R^2$ : 0.1566 baja (15.66%), es decir que explica una pequeña parte de la variabilidad y, por lo tanto, hay un 84.34% que se debe a otros factores no considerados en el modelo. EL p-value del modelo es de  $4.976e-10$ , al ser un valor muy inferior a cualquier nivel de significancia, se rechaza con mucha confianza la hipótesis nula ( $H_0 =$  No hay relación significativa entre las variables). Por lo cual, se concluye que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables dependientes e independientes del modelo.

#### **4.2.1.1.3. Akaike Information Criterion (AIC).**

Al modelar el nivel del mar en función de las variables atmosféricas y oceanográficas, acorde a la **Tabla 6** se obtiene el siguiente resultado como mejor predictor:

- Intercept (34.55) indica el valor del nivel del mar cuando las otras variables son 0.
- Mes (0.0517) cada mes que transcurre, el nivel del mar aumenta en 0.0517 unidades, código de significancia es muy significativo ( $p < 0.001$ ).
- Temporada (0.0796) no es significativo ( $p = 0.41$ ), no tiene un efecto relevante en el nivel del mar.
- Precipitación (-0.0036) a más precipitación, el nivel del mar tiende a disminuir ligeramente, código de significancia es significativo ( $p < 0.05$ ).
- Humedad relativa (-0.0396) al encontrarse elevada conduce a disminuir el nivel del mar, código de significancia es bastante significativo ( $p < 0.01$ ).
- Temperatura superficial del mar (0.1102) a temperaturas mayores, el nivel del mar se eleva, código de significancia es casi significativo ( $p \approx 0.005$ ).
- Salinidad (-0.9895) a mayor salinidad el nivel del mar disminuye severamente, código de significancia es muy significativo ( $p < 0.001$ ).

**Tabla 6.*****Inspección del mejor modelo de regresión***

	<b>Estimation</b>	<b>Std.Error</b>	<b>t value</b>	<b>Pr(&gt; t )</b>
(Intercept)	34.553323	6.397283	5.401	1.20e-07***
Mes	0.051766	0.015071	3.435	0.000661***
Temporada	0.079588	0.097546	0.816	0.415085
Precipitación	-0.003614	0.001477	-2.447	0.014885*
Humedad relativa	-0.039604	0.014699	-2.694	0.007378**
Temperatura superficial del mar	0.110226	0.056883	1.938	0.053424
Salinidad	-0.989485	0.186454	-5.307	1.94e-07***

**Nota. Códigos de significancia: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.**

**Elaborado por: La Autora, 2025**

Por su parte, su  $R^2$ : 0.1557 (15.57%), demuestra una relación débil para detectar una posible tendencia, es decir que explica una pequeña parte de la variabilidad y, por lo tanto, hay un 84.43% que se debe a otros factores no considerados en el modelo. EL p-value del modelo es de  $1.681e-11$ , al ser un valor muy inferior a cualquier nivel de significancia, se rechaza con mucha confianza la hipótesis nula ( $H_0 =$  No hay relación significativa entre las variables). Por lo cual, se concluye que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables dependientes e independientes del modelo.

En la **Tabla 7**, se puede constatar que los datos de predicción son cercanos a los valores extraídos a través de la recopilación y procesamiento de rásters. Sin embargo, su margen de error es del 0.74 al encontrarse en el rango de 0.5 – 1.0 (moderado), por lo cual se lo considera aceptable, sin embargo, se aleja un poco del valor real.

**Tabla 7.**

***Predicciones del nivel del mar***

<b>Nivel del mar</b> <b>[m]</b>	<b>Predicción</b> <b>[m]</b>	<b>Error absoluto</b> <b>[m]</b>	<b>Error relativo</b> <b>[%]</b>
-2.53	-2.92	0.39	15.36
-3.40	-2.73	-0.67	19.56
-3.24	-2.58	-0.66	20.51
-3.15	-2.41	-0.74	23.50
-3.44	-2.60	-0.84	24.52
-3.06	-2.61	-0.45	14.64
-3.22	-2.60	-0.62	19.28
-3.37	-2.44	-0.93	27.63
-2.91	-2.43	-0.48	16.46
-3.53	-2.54	-0.99	28.16
-3.46	-2.42	-1.04	30.03
-3.34	-1.90	-1.44	43.16
-2.53	-2.66	0.13	5.06
-3.60	-2.53	-1.07	29.73
-3.65	-2.61	-1.04	28.54
-3.65	-2.49	-1.16	31.66
-3.44	-2.84	-0.60	17.56
-3.06	-2.62	-0.44	14.40
-3.22	-2.54	-0.68	21.11
-3.47	-2.76	-0.71	20.44
-2.91	-2.57	-0.34	11.62
-3.73	-2.74	-0.99	26.56
-3.46	-2.53	-0.93	26.77
-3.34	-1.99	-1.35	40.27
Promedio		0.74	21.49%

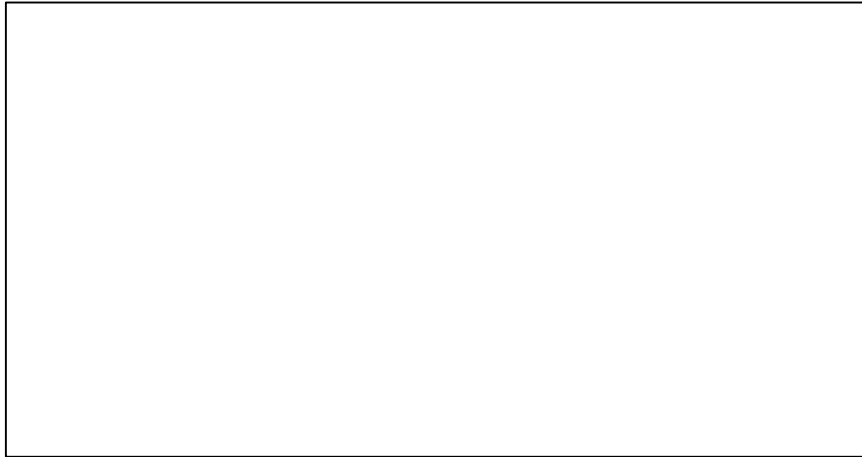
**Elaborado por: La Autora, 2025**

**4.2.1.1.4. Segmentación de mapas de calor por temporada.**

• **Análisis por temporada del nivel del mar**

Según lo representado en la **Figura 9**, el nivel del mar muestra oscilaciones periódicas con menor intensidad en relación al invierno (**Figura 10**). Asimismo, el nivel del mar tiende a valores más (más negativos) notablemente después del día 150 del año.



**Figura 9.*****Variación del nivel del mar en verano***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

En la **Figura 10**, se observa una mayor fluctuación en el nivel del mar con picos más marcados y cambios abruptos en cortos períodos de tiempo. Además, se visualizan oscilaciones del nivel del mar que tienden a mantenerse en valores altos (menos negativos) a comparación del verano (**Figura 9**), particularmente en los primeros 150 días del año.

**Figura 10.*****Variación del nivel del mar en invierno***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

Con respecto a la estacionalidad (temporadas), las variaciones responden a un patrón cíclico o periódico, con una amplitud muy significativa. Esto podría estar vinculado al aumento de precipitaciones y temperaturas durante la temporada del invierno Antártico.

#### **4.2.1.1.5. Verano Antártico.**

Referente a los hallazgos (**Figura 11**), la precipitación mantiene en mayor medida una correlación positiva débil de 0.36 en cuanto a la humedad relativa. Asimismo, la precipitación y la velocidad del viento mostraron una correlación positiva débil entre sí de 0.31; esto podría asociarse a la influencia de las altas temperaturas, dado que permite al aire retener más vapor de agua. Del mismo modo, la presión atmosférica y temperatura superficial del mar presentaron una correlación positiva de 0.28, a causa de que los vientos de alta presión presentes en el verano Antártico influyen en la TSM, al originarse la mezcla vertical del agua y limitar el ascenso de aguas frías desde las profundidades. A su vez, se evidenció una correlación ligeramente positiva de 0.17 entre la salinidad y velocidad del viento, debido a la presencia de vientos fuertes que impiden la mezcla de las capas de agua y a su vez, reduce la reincorporación de agua dulce y transporta agua salada desde otras regiones, lo que conduce al aumento de salinidad en ciertos espacios del área de estudio.

Por su parte, la precipitación y presión atmosférica revelaron una correlación negativa moderada de -0.43, esto es atribuible a la presencia de sistemas de baja presión y vórtice polar que dan origen a vientos fuertes conllevando al aumento de la precipitación y disminución de la presión atmosférica. Asimismo, la velocidad del viento demostró una correlación negativa moderada referente a la temperatura superficial del mar de -0.43, esto se debe a la mezcla de las capas de agua, redistribución del hielo marino y transporte de agua fría a través de las corrientes oceánicas, que consiguen aminorar la TSM en condiciones de vientos fuertes. Por último, se evidenció una correlación negativa moderada de -0.29 entre la presión atmosférica y velocidad del viento, esto es atribuible a la presencia de sistemas de baja presión y vórtice polar que dan origen a vientos fuertes conllevando al aumento de la velocidad del viento y disminución de la presión atmosférica.

En lo que concierne al nivel del mar, destaca una correlación negativa moderada de -0.33 en lo que respecta a la precipitación. No obstante, se evidencia una correlación débil negativa de -0.19 en relación a la humedad relativa, ya que, al formarse sistemas de alta presión, el aire se torna más denso originando un efecto de “bajada” sobre el agua, de tal manera que contribuye a una ligera reducción de la cantidad de agua que se eleva hacia la superficie, sin embargo, el nivel del mar no refleja ser consistente en cuanto a su mínimo aumento.

**Figura 11.*****Correlograma de verano Antártico***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

***4.2.1.1.6. Invierno Antártico.***

Basándose en los resultados alcanzados (**Figura 12**), la precipitación presenta una relación levemente positiva de 0.18 con la humedad relativa, esto podría estar vinculado a la interrelación entre eventos de tormentas, condiciones topográficas y la limitada capacidad de aire para retener humedad en un entorno extremadamente frío. Además, la precipitación y temperatura superficial del mar mostraron una correlación positiva débil entre sí de 0.15. precipitación y salinidad 0.12, considerando la interconexión entre las corrientes oceánicas y variabilidad climática, lo que ocasiona temporalmente el aumento de TSM y posibilitar la formación de precipitaciones.

Por otra parte, la precipitación y presión atmosférica exhiben una correlación negativa moderada de -0.54, esto se relaciona principalmente a la asociación entre sistemas de baja presión y precipitación, dado que tiene impacto en la dinámica atmosférica de la zona de estudio formación de eventos de precipitación. Adicionalmente, la humedad relativa mantiene una correlación negativa moderada de -0.40 con la temperatura superficial del mar, esto se debe a los principales

factores como formación de hielo marino, vientos catabáticos secos y la limitada capacidad de aire de conservar humedad en un ambiente extremadamente frío.

A su vez, la velocidad del viento y humedad relativa manifiestan una correlación débil negativa de -0.19, esto ocurre por la presencia de vientos catabáticos secos, reducción de la evaporación y sublimación, al igual que la poca redistribución de masas de aire, lo que contribuye a la disminución de la humedad relativa y ligero aumento de la velocidad del viento. De la misma manera que la velocidad del viento mantiene una correlación ligeramente negativa de -0.15 con la presión atmosférica, esto es atribuible a la presencia de sistemas de baja presión y vórtice polar que dan origen a vientos fuertes conllevando al aumento de la velocidad del viento y disminución de la presión atmosférica. La presión atmosférica y salinidad indican una correlación débil negativa de -0.11, por la existencia de sistemas de baja presión, precipitación y formación de hielo marino, lo cual conlleva a la reducción de la salinidad en condiciones de baja presión.

En lo que compete a las variables oceanográficas, la temperatura superficial del mar manifiesta una correlación positiva moderada con el nivel del mar de 0.22, esto se debe a la expansión térmica del agua y variabilidad climática, que inciden en la TSM y producen un leve aumento del nivel del mar. Por otra parte, la salinidad refleja una correlación negativa moderada con el nivel del mar de -0.21, lo que alude que cuando se presenta un aumento en la salinidad el nivel del mar disminuye, esto podría estar vinculado con los procesos de evaporación o permutaciones en la densidad del agua.

Finalmente, la humedad relativa y el nivel del mar mantienen una correlación negativa moderada de -0.20, se deduce que su principal causa es la presencia de vientos catabáticos secos y cambios en el patrón de distribución de masas de aire, lo que trae consigo la disminución de la humedad relativa en áreas donde el nivel del mar es inferior localmente debido a la formación de masas glaciares.

**Figura 12.*****Correlograma de invierno Antártico***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**4.2.2 Transformada de Fourier****4.2.2.1. Descomposición de la serie temporal.**

Según la **Figura 13** de la serie temporal, sus componentes se pueden dar por el método aditivo, ya que no se presenta una amplitud constante de los picos y valles que nos inciten a llevar a cabo una composición multiplicativa.

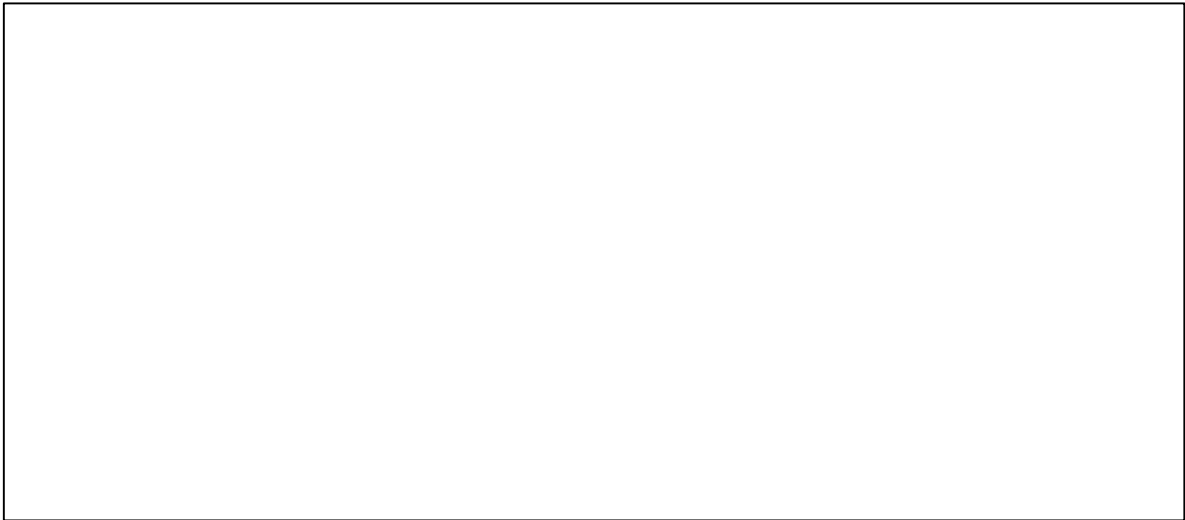
**Figura 13.*****Serie temporal del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

En la **Figura 14**, se puede observar la componente de tendencia revela una clara tendencia a la disminución del nivel del mar en la Antártica desde 1993 al 2023, que se han reducido en más de 2 metros, con tramos más o menos estables entre enero del 2009 y mayo del 2019.

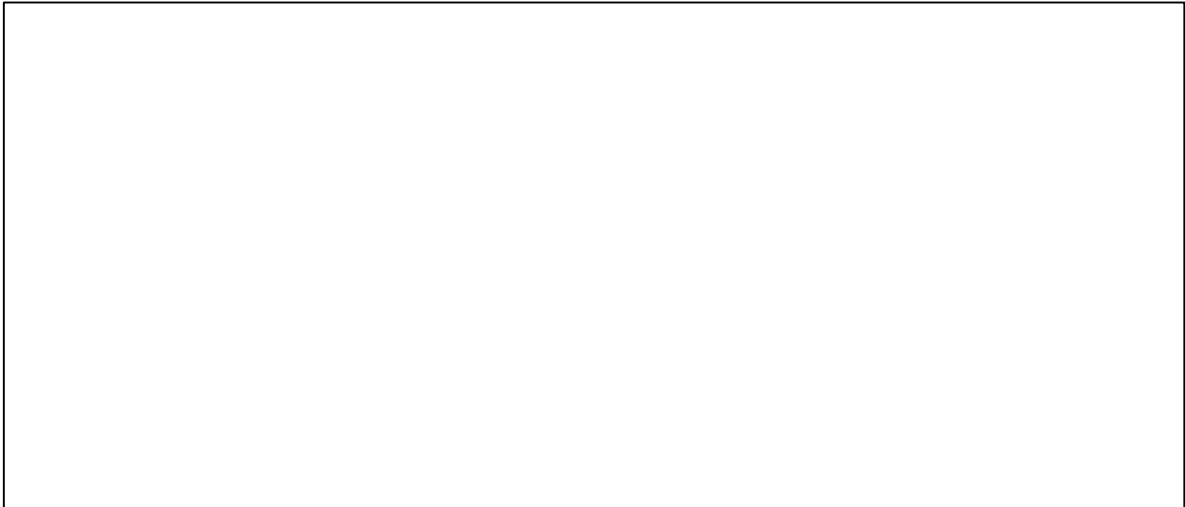
**Figura 14.**

***Componente de tendencia del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica***



**Elaborado por: La Autora, 2025**

La componente estacional nos ayuda a identificar patrones que se repiten por temporada, una vez eliminada la tendencia (**Figura 15**). En este caso, se puede diferenciar, según el historial, que el mes de diciembre suele presentarse el nivel más alto y en marzo, el nivel más bajo, lo que muestra una oscilación periódica bien definida que oscila entre aproximadamente -0.4 y 0.6 m, lo que manifiesta un cambio estacional significativo del nivel del mar. A su vez, es característico que, en una componente estacional, la forma y frecuencia de estas oscilaciones se repitan de manera constante.

**Figura 15.*****Componente estacional del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

La componente aleatoria (**Figura 16**) nos presenta la variabilidad no explicada y probablemente provocada por eventos esporádicos e impredecibles. En cuanto a la variabilidad residual, se observan fluctuaciones rápidas y de corta duración, que oscilan alrededor de los -0.6 y 1.0 m. Adicionalmente, se observa un “ruido” en la amplitud de las fluctuaciones que difieren en el transcurso del tiempo, con algunos picos significativos entre el 2020 y 2023, sus principales causas podrían ser la presencia de eventos extremos como El Niño y La Niña, al igual que los cambios dinámicos oceánicos o atmosféricos que no mantienen patrones regulares.

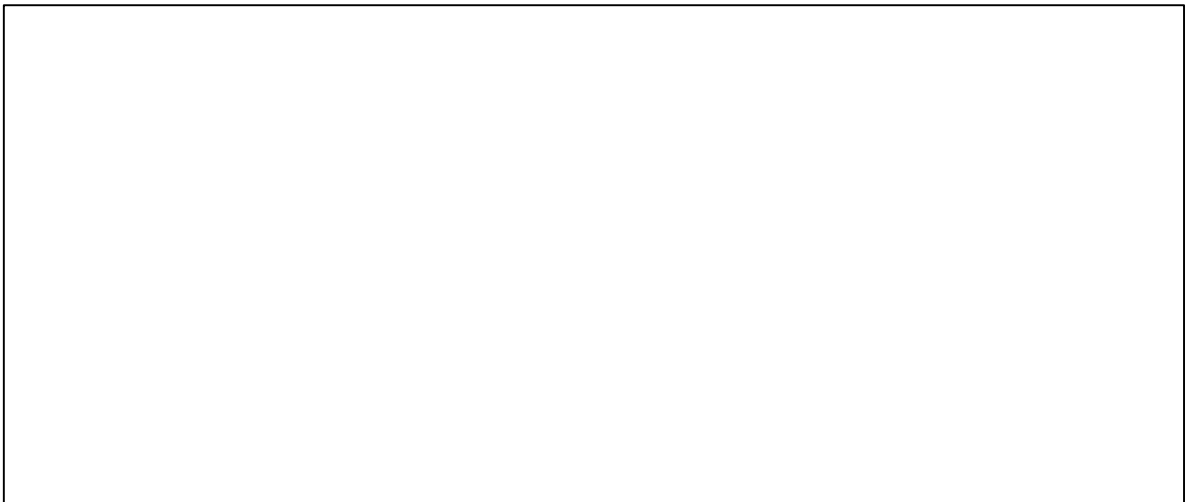
**Figura 16.*****Componente aleatoria del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

La **Figura 17**, muestra la serie centrada del nivel del mar con su media ajustada a 0, para esto, se eliminó su componente de tendencia para facilitar el análisis de frecuencias. Al presenciarse oscilaciones claras y repetitivas a lo largo de toda la serie, se ostenta la presencia de componentes estacionales, que se mantienen entre los -1.0 y 1.0 m. No obstante, se evidencian fluctuaciones más extremas entre 1993 al 2000, que podrían estar ligadas a la aparición de fenómenos naturales.

**Figura 17.**

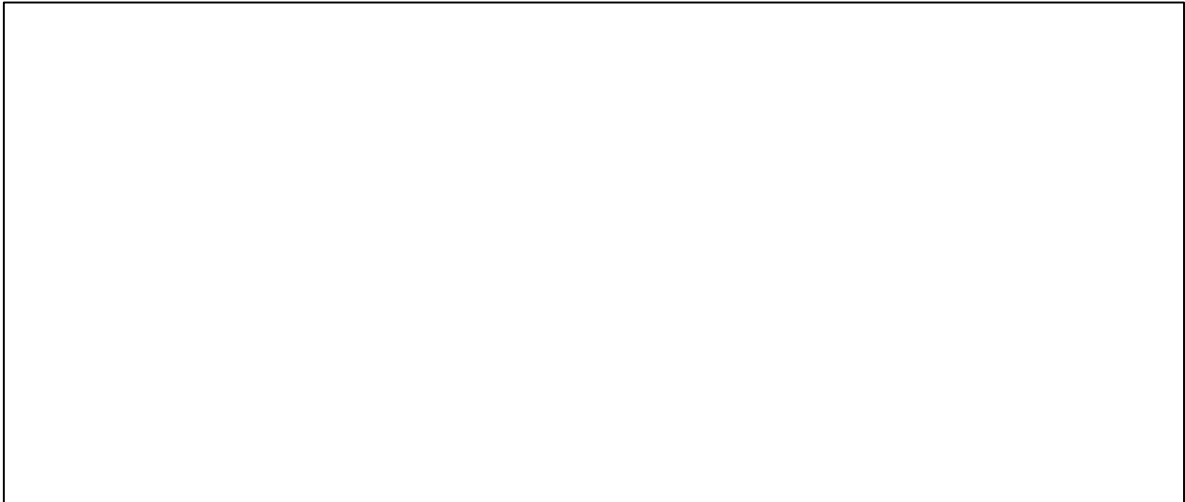
***Serie centrada del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica***



**Elaborado por: La Autora, 2025**

Como se visualiza en la **Figura 18**, se realizó el cálculo la transformada rápida de Fourier de la serie de tiempo, para extraer su espectro de frecuencias que dio como resultado 0.5, lo cual refleja un ciclo de alta frecuencia que representa una variación semestral del ciclo anual.



**Figura 18.*****Espectro de frecuencias del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica*****Elaborado por: La Autora, 2025**

Tal como indica la **Figura 19**, se observa dentro del espectro la presencia de 3 frecuencias con su respectiva magnitud dominante: 1.2 meses con una magnitud dominante de 59.10 (oscilación de alta frecuencia y mareas quincenales), 2 meses con una magnitud dominante de 45.64 (ciclos de marea o procesos oceánicos) y 6 meses con una magnitud dominante de 45.64 (transiciones estacionales).

**Figura 19.*****Espectro completo del nivel del mar Ensenada Gye, Antártica*****Elaborado por: La Autora, 2025**

#### **4.2.2.2. Red neuronal (Machine learning)**

##### **4.2.2.2.1. Árbol de decisión**

De acuerdo con lo que se visualiza en el **Apéndice N° 1**, las primeras divisiones cerca de la raíz, las cuales indican las variables más importantes que se deben considerar en la predicción y comportamiento del nivel del mar (presión atmosférica, humedad relativa, dirección/velocidad del viento, temperatura del mar y presión atmosférica). Por otra parte, el árbol revela que respecto a las variaciones semestrales (estaciones del año) las combinaciones de la dinámica atmosférica y oceánica influyen significativamente en la altitud del mar.

#### **4.3 Diseño de un sistema de alerta temprana ante posibles aumentos significativos del nivel del mar.**

##### **4.3.1 Modelo conceptual para la implementación del sistema de alerta temprana (SAT)**

**Figura 20.**

##### ***Modelo conceptual del SAT***



**Elaborado por: La Autora, 2025**

Como se visualiza en la **Figura 20**, el modelo teórico del SAT contiene 3 componentes fundamentales, los cuales son científicos, tecnológicos y sociales, en vista de que manejan la información recopilada de manera constante, permanente y cíclica entre sí. En lo que concierne al diseño del SAT, el componente científico provee registros históricos tanto de investigaciones científicas como de los sensores remotos, de los cuales se extrajeron las imágenes satelitales. Una vez

compiladas se lleva a cabo el procesamiento, elaboración de mapas y gráficos estadísticos, que facilita la extracción de datos para su respectivo análisis y diseño de la aplicación “SAT ENSENADA GYE ANTÁRTICA”, lo cual ya contempla como componente tecnológico. Finalmente, el componente social consiste en la divulgación de los resultados obtenidos a la comunidad científica y público en general, con la finalidad de mantenerlos informados sobre los cambios que se han generado a partir de 1993 hasta 2023 en la Ensenada Guayaquil Antártica en relación a sus condiciones climatológicas y su incidencia a escala global.

#### **4.3.1.1. Componente científico.**

- ✓ Utilización de registros obtenidos de sensores remotos (ERA5, OSTIA y CMEMS), imágenes satelitales y modelos climáticos empleados en investigaciones científicas.
- ✓ Análisis exhaustivo de diversas fuentes bibliográficas con respecto a la influencia de la Antártida en el clima global, particularmente en eventos como El Niño-Oscilación Sur (ENSO) y alteraciones en los patrones de circulación atmosférica para la interpretación de los mapas finales.
- ✓ Identificación del impacto que origina el deshielo masivo del área en estudio en la circulación oceánica y su relación con el nivel del mar.

#### **4.3.1.2. Componente tecnológico.**

- ✓ Extracción de imágenes satelitales (rásters) de la plataforma oficial de Copernicus Climate Change Service (C3S) y Copernicus Marine Service del Programa de la Observación de la Tierra de la Unión Europea.
- ✓ Uso del software QGIS 3.40.0 con ayuda de la herramienta “combar (reproyectar)” para llevar a cabo el procesamiento de rásters de las variables en estudio: precipitación, temperatura del aire, presión atmosférica, dirección/velocidad del viento, humedad relativa, temperatura superficial del mar, salinidad y nivel medio del mar.
- ✓ Diseño del SAT con la integración de datos históricos, ya que permite la mejora de la precisión de las alertas y al mismo tiempo, fortalecer la capacidad adaptiva de las comunidades ante posibles fenómenos naturales extremos.

##### **4.3.1.2.1. Propósito del SAT.**

El principal objetivo del SAT es prevenir y mejorar la calidad de vida de las personas, al igual que generar información relevante a escala temporal que sirva

para identificar áreas de alto riesgo, proponer soluciones viables y fortalecer la capacidad de respuesta ante posibles amenazas, logrando así un impacto positivo en la calidad de vida de las personas. Adicionalmente, la disponibilidad de datos históricos en cuanto a las variables atmosféricas y oceanográficas facilitará a escala global la implementación de intervenciones correctivas o preventivas en cuanto a sus planificaciones territoriales.

#### **4.3.1.3. Componente social**

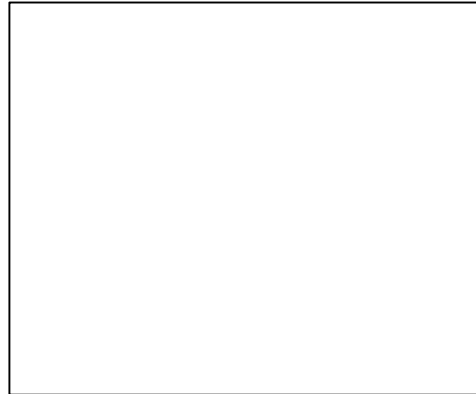
- ✓ Socialización de los resultados hacia la comunidad científica y sociedad en general, con la finalidad de que se encuentren al tanto de como la variabilidad climática de la Ensenada Gye Antártica incide a nivel global.
- ✓ Uso de datos históricos para la toma de decisiones y políticas públicas, con el debido respaldo de acuerdos internacionales como el Tratado Antártico.
- ✓ Estimular la cooperación tanto internacional como nacional en lo que respecta al monitoreo climático, predicción de eventos extremos y formulación de estrategias de adaptación.
- ✓ Incentivar a las entidades gubernamentales y a su vez, a la comunidad científica en fortalecer los programas de educación ambiental sobre la significancia de la Antártida en el sistema climático global y simultáneamente, llevar a cabo la preparación de simulacros ante posibles riesgos a futuro.

#### **4.3.2 SAT Ensenada Guayaquil, Antártica**

##### **4.3.2.1. Descripción general.**

##### **4.3.2.1.1. Enfoque de la aplicación.**

La app fue desarrollada, con el propósito de compartir con el público medidas de prevención ante posibles desastres naturales a futuro, como consecuencia del retroceso de glaciares y aumento del nivel de mar en franjas costeras a nivel global.

**Figura 21.*****Diseño del logo del SAT*****Elaborado por: La Autora, 2025**

Por otra parte, el logo del sistema de alerta temprana de la Ensenada Gye Antártica, muestra los diferentes escenarios que podrían presentarse a futuro debido a la influencia de la variabilidad climática en el área de estudio que forma parte de la región Antártica y que repercute a nivel global.

**4.3.2.1.2. Funciones.**

- ✓ En el SAT se podrá visualizar datos históricos de las variables atmosféricas y oceanográficas durante el lapso de tiempo de 1993 - 2023. De la misma forma, el usuario podrá acceder a través del menú principal, tanto a la sección “variables atmosféricas” como a la sección “variables oceanográficas”. Cada sección contiene sus respectivas variables, y simultáneamente, cada variable permite la demostración de registros históricos a representados a través de gráficas estadísticas interactivas con su respectiva tabla de datos.
- ✓ El SAT indica acerca de los principales desastres naturales que se podrían presentar en cuanto a las afectaciones negativas hacia la región e inclusive repercutir a escala mundial, cada uno de ellos proporciona información relevante en cuanto a los niveles de alerta y acciones en base a los datos relevantes recopilados en la zona de estudio.
- ✓ La comunidad podrá involucrarse de manera activa en cuanto al intercambio de información actualizada, de tal manera que contribuyan como aporte científico para la ejecución de proyectos y diseño de estrategias que permitan salvaguardar la seguridad de la población.

- ✓ Respuesta más ágil ante circunstancias de emergencia, al contar con la colaboración de expertos, autoridades locales y la comunidad en general, esto fortalecerá el sistema de alerta y facilitará la toma de decisiones informadas.
- ✓ Fomentar el aprendizaje colectivo y brindar sugerencias de mejora que permitan una mejor preparación y resistencia frente a catástrofes naturales o cualquier peligro que atente contra la seguridad de la comunidad.

#### **4.3.2.1.3. Características del usuario.**

El acceso a la aplicación es para cualquier usuario general que cuente con el link de acceso de la app o código QR. Los usuarios podrán acceder a las diversas funciones que tiene disponible, ya que no es necesario que cuenten con una membresía especial, ni realizar algún pago para instalar la app. El único requisito es contar con una buena conexión a internet, ya sea mediante datos móviles o conexión inalámbrica.

#### **4.3.2.2. Restricciones generales.**

##### **4.3.2.2.1. Políticas reguladoras.**

Se realizó el diseño y desarrollo teórico de esta aplicación utilizando las herramientas que proporciona Glide. De acuerdo con sus lineamientos internos, se debe mantener un ambiente propicio. Adicionalmente, la app no usa sistema de programación, sin embargo, utiliza flujos de trabajos con interfaz intuitiva.

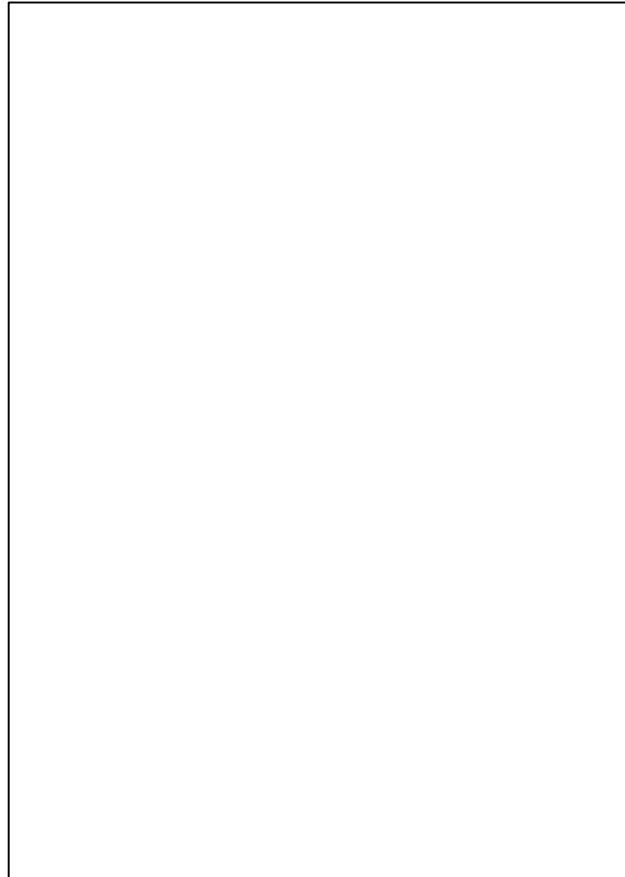
##### **4.3.2.2.2. Requisitos del lenguaje.**

La aplicación se encuentra exclusivamente en español, dado que es el más empleado por los usuarios.

#### **4.3.2.3. Sistema de alerta temprana.**

##### **4.3.2.3.1. Interfaz de usuario.**

En la Figura, se presenta la página de bienvenida de la aplicación "SAT ENSENADA GYE ANTÁRTICA" desarrollada en Glide. Para acceder a la aplicación, se presentan dos alternativas "Ingresar a través de correo electrónico" o "Iniciar sesión con Google".

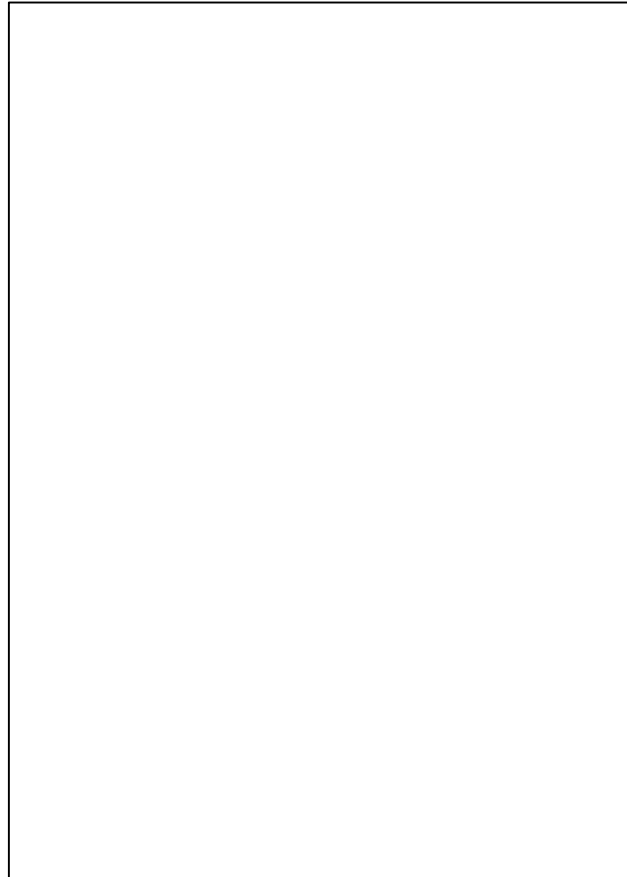
**Figura 22.*****Interfaz de usuario***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

Por lo tanto, si optas por ingresar a través del correo electrónico, tendrás que ingresar tu dirección de correo electrónico y contraseña en los campos establecidos. De igual manera, si decides utilizar alguna cuenta de Gmail, se selecciona la opción “Iniciar sesión con Google”, lo que te llevará a una ventana emergente en la que deberás escoger tu cuenta de Gmail o introducir tus credenciales si no has accedido previamente al dispositivo. Una vez comprobada la información, la aplicación te dirigirá de manera automática a la página principal.

***4.3.2.3.2. Interfaz de página principal.***

Con respecto a la Figura, se presenta la página principal del SAT la cual da la bienvenida a la app con la finalidad de llamar la atención del público. Al dar click en la opción de comenzar te dirigirá al interfaz de variables atmosféricas.

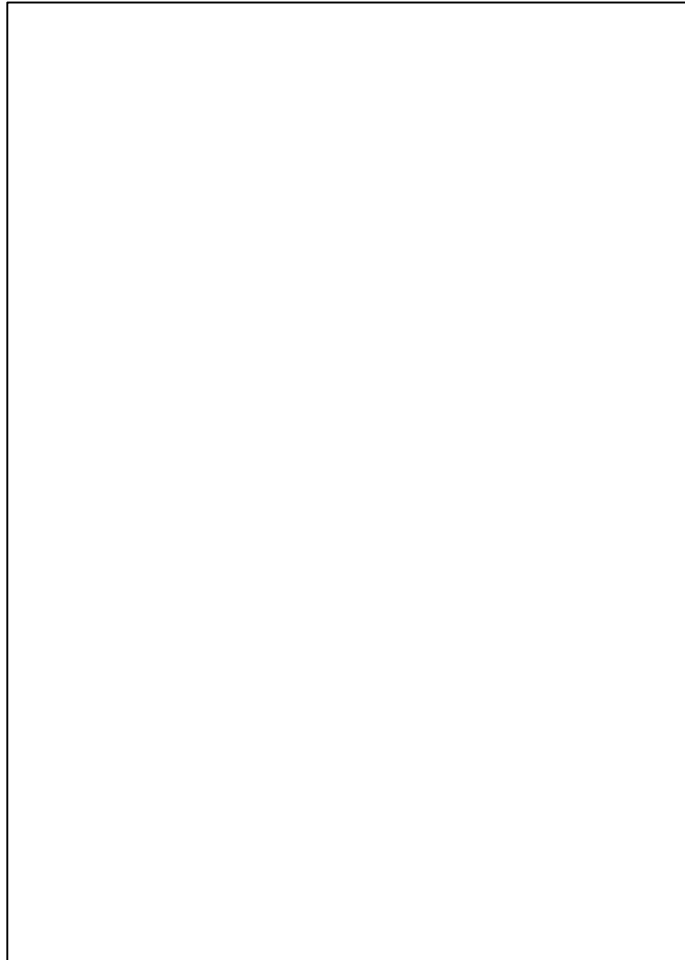
**Figura 23.*****Interfaz de la página principal***

**Elaborado por: La Autora, 2025**

***4.3.2.3.3. Interfaz del menú principal de la aplicación.***

De acuerdo a la Figura, se presenta el menú principal de la aplicación, diseñado de forma intuitiva para simplificar la navegación y acceso a las distintas funcionalidades. Cada sección cumple con una función determinada, para lo cual facilita el acceso al usuario el acceso a los recursos necesarios respecto a la actividad que quiera llevar a cabo.

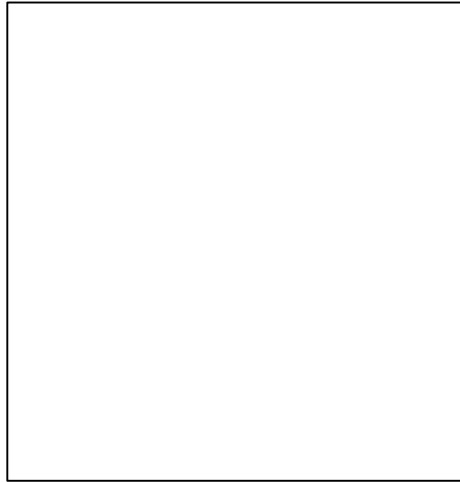


**Figura 24.****Interfaz del menú principal**

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**4.3.2.3.4. Interfaz de la pestaña “Variables atmosféricas”.**

En lo que concierne a la Figura, dentro de la sección se presentarán las 5 variables atmosféricas estudiadas (precipitación, temperatura del aire, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento y humedad relativa).

**Figura 25.****Variables atmosféricas**

**Elaborado por: La Autora, 2025**

Cada sección pertenece a una variable, la cual incluye un gráfico estadístico interactivo de los datos promedios desde 1993 hasta 2023. Además, se puede visualizar una tabla que incluye datos más específicos en relación al gráfico estadístico para un mejor entendimiento.

**4.3.2.3.5. Interfaz de la pestaña “Variables oceanográficas”.**

En relación a la Figura, dentro de la sección se presentarán las 3 variables oceanográficas estudiadas (temperatura superficial del mar, salinidad y nivel del mar). Cada sección (variable) incluye un gráfico estadístico interactivo de los datos promedios desde 1993 hasta 2023. Además, se puede visualizar una tabla que incluye datos más específicos en relación al gráfico estadístico para una mejor comprensión.

**Figura 26.****Variables oceanográficas**

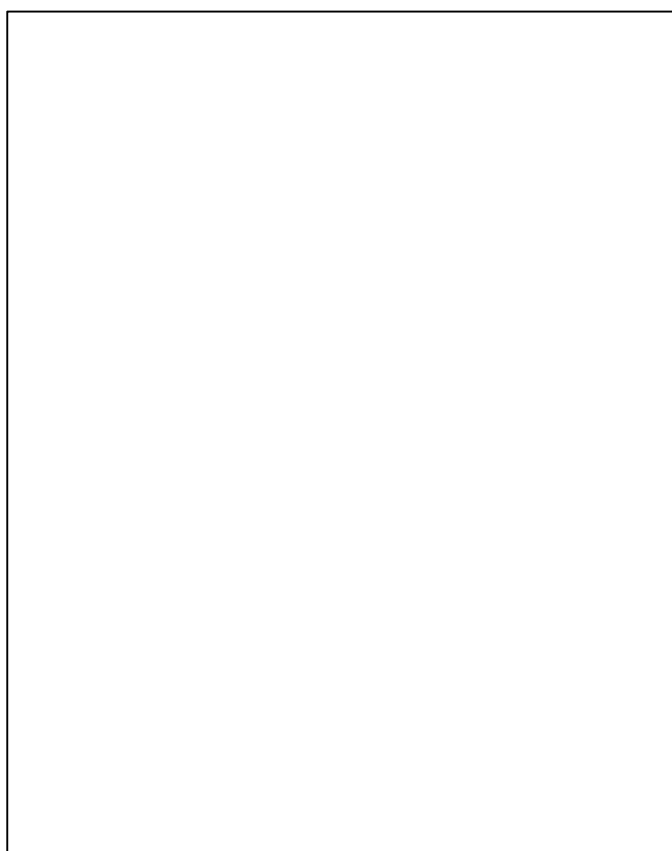
**Elaborado por: La Autora, 2025**

#### **4.3.2.3.6. Interfaz de la pestaña “Medidas de prevención”.**

En cuanto a la Figura, el propósito de la pestaña de medidas de prevención es promover una actitud preventiva en los usuarios, posibilitando que se informen y a la vez, consulten de manera interactiva recomendaciones en base a los principales eventos naturales que se podrían presentar (perturbaciones de El Niño Oscilación (ENOS), inundación, erosión, salinización y mayor presencia de ciclones tropicales), esto a su vez les permitirá prepararse a futuro para salvaguardar su seguridad.

#### **Figura 27.**

#### ***Medidas de prevención***

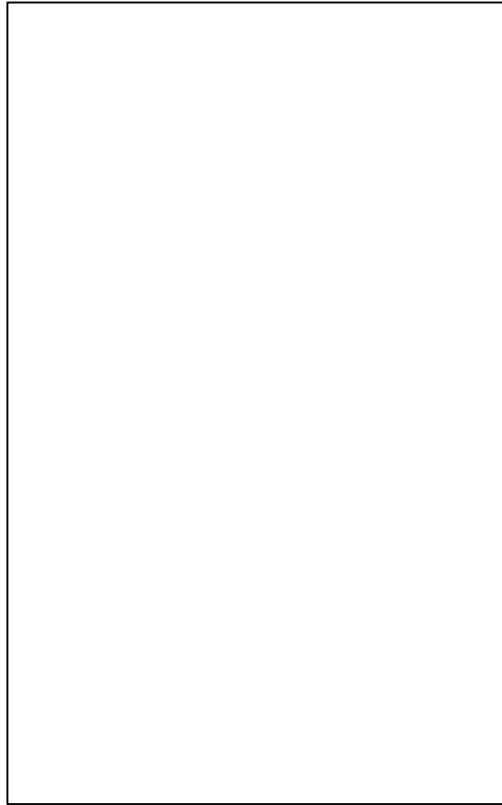


**Elaborado por: La Autora, 2025**

#### **4.3.2.3.7. Interfaz de la pestaña “Comunidad”**

Con respecto a la Figura, la sección de comunidad es creada con la finalidad de invitar a estudiantes, investigadores y profesionales a contribuir con sus conocimientos, experiencias, realizar las respectivas interrogantes, comentarios y sugerencias para hacer del SAT una herramienta aún más efectiva.

**Figura 28.**  
***Comunidad***



**Elaborado por: La Autora, 2025**

## 5. DISCUSIÓN

De acuerdo al estudio de Zazo (2006) existen variaciones en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en los interglaciares más antiguos y actuales, al igual que la temperatura superficial del mar produciendo un aumento del valor promedio de 5-6 °C, debido a la influencia de los cambios abruptos causados por los procesos atmosféricos que condujeron a una alteración climática que interviene en la dinámica de los océanos. En cuanto a los resultados obtenidos representan una similitud en cuanto a lo que respecta a la temperatura del aire, dado que se ha reflejado un incremento medio durante los años recientes del período de estudio de hasta -0.17 °C. Por el contrario, la presión atmosférica promedio es de 990.08 hPa, por efecto de los sistemas de alta presión. Por último, la humedad relativa media es de 90.58%, puesto a que existe una gran cantidad de vapor de agua que se almacena en las masas de aire.

Por otra parte, en base a los resultados obtenidos en el estudio de Fuenzalida et al. (2008), se determinaron anomalías del nivel medio del mar (MSLA) y TSM en relación con una media de siete años (1993-1999) con respecto a la corriente de Humboldt, los cuales indicaron como resultado una tendencia del nivel del mar a partir de 1999 con un valor de 1.7 mm/año y temperaturas del mar que superan los 6 °C debido a que su dinámica de circulación oceánica consiste en transportar agua superficial subantártica fresca y fría hacia el norte a lo largo del borde oriental del giro subtropical. Estos hallazgos mantienen cierta coincidencia con los resultados alcanzados en la presente investigación, dado que el nivel del mar promedio de la Ensenada Guayaquil, que forma parte de la Antártica posee un descenso significativo de -2.46 m. Es evidente que a partir del año 2000 ha ido decreciendo hasta obtener un valor mínimo de -3.34 m. Cabe destacar que la disminución del nivel del mar en la región Antártica se debe a la reducción de plataformas de hielo, esto a su vez, repercute negativamente a escala mundial causando un aumento del nivel del mar en áreas costeras y a la vez, genera cambios en la circulación oceánica. Adicionalmente, la temperatura superficial del mar promedio es de -0.18, lo que indica temperaturas que no son habituales para el área de estudio e incluso se ha reflejado un incremento de hasta los 0.25 °C.

De acuerdo con Fraile (2011), su estudio señala que la variación del nivel medio del mar de hasta 1.5 metros en el litoral Andaluz, por lo cual se verá afectado en mayor o menor medida por la subida de las masas de agua, provocando una

intensificación de los procesos erosivos en las costas, zonas pantanosas, desembocaduras de ríos y una gran desviación de cauces fluviales. Los resultados muestran una leve discrepancia con la hipótesis planteada en este proyecto debido a que los parámetros varían de acuerdo al área de estudio, sin embargo, sigue siendo válida dentro del marco de la investigación, dado que los cambios locales a nivel mundial en relación al nivel del mar son consecuencia de las perturbaciones atmosféricas y oceanográficas. Si bien es cierto en esta investigación los cambios del nivel del mar fueron moderados, ya que los análisis estadísticos aplicados como la transformada de Fourier y regresión múltiple, confirmaron la existencia de patrones cíclicos que se mantienen entre los -1.0 y 1.0, al igual que la influencia significativa de las variables atmosféricas y oceanográficas sobre el comportamiento del nivel del mar. Los resultados muestran una leve discrepancia con la hipótesis planteada en este proyecto, debido a que los parámetros varían de acuerdo al área de estudio, sin embargo, sigue siendo válida dentro del marco de la investigación, dado que los cambios locales a nivel mundial en relación al nivel del mar son consecuencia de las perturbaciones atmosféricas y oceanográficas.

Según Goharnejad et al. (2013), a través del diseño de 2 escenarios de cambio climático A1b y A2 en la costa sur de Irán, revelan predicciones del incremento del nivel medio del mar de aproximadamente 0.33 m y 0.59 m. A comparación del estudio, se visualiza un comportamiento semejante, pero con diferentes magnitudes de 59.10 en el ciclo estacional de 6 meses en relación al nivel del mar que se estima entre los -1.0 y 1.0 m. La transformada de Fourier y regresión múltiple permitiendo identificar que las fluctuaciones del nivel del mar son influenciadas por componentes cíclicas y aleatorias, al igual que las variables climatológicas. Es evidente, que los valores expuestos no son parecidos al estudio mencionado anteriormente. Sin embargo, la investigación respalda que las magnitudes del nivel del mar pueden diferir, pero el riesgo de la subida del nivel del mar es congruente con las investigaciones internacionales y por ello, se debe considerar con severidad la planificación territorial específicamente en zonas costeras.

Con respecto al estudio realizado por Estrada (2013) sobre la variabilidad del nivel del mar en la Antártida, se centró solamente en pronósticos a futuro para los cuales se encontraron estimaciones científicas de la tasa promedio de aumento del nivel del mar (2.5 mm por año). Estas suposiciones son esenciales para

anticipar posibles escenarios, por lo que se pronostica un aumento de la temperatura de 2.5 °C durante los próximos 80 años como resultado del calentamiento global. Del mismo modo, el nivel del mar aumentará entre 0.10 y 0.88 m, pero una gama tan amplia de proyecciones muestra claramente las incógnitas que existen en la comunidad científica internacional, principalmente debido a la falta de información estandarizada y a los fenómenos climáticos. A diferencia del estudio mencionado, se diseñó un sistema de alerta temprana en base a los datos atmosféricos y oceanográficos recopilados desde 1993 hasta 2023, ya que señalan que efectivamente existe un aumento de la superficie marina a nivel mundial debido a la variabilidad climática y disminución significativa del nivel del mar que se presenta en la Ensenada Guayaquil Antártica, lo que acontece al origen de desastres naturales que son la principal amenaza de la sociedad a futuro.

Para finalizar, Nevermann et al. (2023) manifiestan un aumento significativo del nivel del mar en los últimos años en comparación con décadas anteriores. Asimismo, enfatiza la falta de preocupación y preparación por parte de la población ante los principales impactos negativos que podrían presentarse a futuro tanto en la naturaleza como en la sociedad, sin dejar de lado que los aledaños a zonas costeras se encuentran mayormente expuestos a este tipo de amenazas, respecto a las inundaciones y erosión del suelo. En relación con el estudio actual se elaboró una aplicación que sirva como SAT con la finalidad de fortalecer la capacidad de respuesta de la comunidad ante posibles desastres naturales y a su vez, fomentar un aprendizaje colectivo que permita salvaguardar la seguridad de la población.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

La compilación de imágenes satelitales se realizó a través de la plataforma oficial de Copernicus Climate Change Service (C3S) y Copernicus Marine Service del Programa de la Observación de la Tierra de la Unión Europea. En cuanto a los datos promedios del período de estudio 1993 – 2023 en la Ensenada Guayaquil Antártica, se determinó que la precipitación se mantiene en los 79.46 mm indicando que es una zona con precipitaciones bajas. Por otro lado, la temperatura del aire presenta un valor promedio de  $-1.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , es evidente que a partir del 2018 se ha reflejado un aumento de hasta  $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En cambio, la presión atmosférica promedio es de 990.08 hPa, lo cual demuestra que existen zonas de transición que presentan sistemas de alta presión y a la vez, normales. La velocidad del viento refleja un promedio de 7.67 m/s, esto señala que son condiciones moderadas, pero con un incremento habitual de la velocidad que suelen aparecer en zonas abiertas. Por otra parte, la humedad relativa media es de 90.58%, esto señala una alta saturación debido a que el área de estudio se encuentra en contacto directo con masas de agua fría y hielo en fusión. Desde otra perspectiva, la temperatura superficial del mar promedio es de  $-0.18$ , lo que indica temperaturas inusualmente “cálidas” para la zona de estudio, no obstante, con el transcurso del tiempo la temperatura del mar se ha visto en aumento siendo demasiado notable durante el 2022 y 2023 reflejando una temperatura alrededor de los  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por su parte, la salinidad demuestra una media de 33.75 UPS, aunque es evidente que en los dos últimos años del período de estudio ha alcanzado un máximo de 34.22 UPS, pese a ello aún se considera en condiciones normales. Por último, el nivel del mar promedio representa un descenso significativo de  $-2.46\text{ m}$  en la zona de estudio, es notorio que a partir del año 2000 ha ido decreciendo hasta obtener un valor mínimo de  $-3.34\text{ m}$ . Cabe destacar que la disminución del nivel del mar en la región Antártica se debe a la reducción de plataformas de hielo, esto a su vez, repercute negativamente a escala mundial causando un aumento del nivel del mar en áreas costeras y cambios en las corrientes oceánicas.

Con respecto al modelo de regresión de múltiples variables, los resultados obtenidos permiten deducir que el mejor modelo de predicción cuenta con un margen de error del 0.74 considerado aceptable, con un  $R^2$  del 0.1557 y p-value del modelo de  $1.681\text{e-}11$ , lo que permite aceptar la hipótesis planteada en la presente



investigación, ya que existe una relación significativa entre las variables atmosféricas y oceanográficas en función del nivel del mar. Simultáneamente, se rechaza con mucha confianza la hipótesis nula al ser un valor muy inferior a cualquier nivel de significancia. Por otra parte, la transformada de Fourier y árbol de decisiones permitieron corroborar las transiciones estacionales que se presentan cada 6 meses (verano e invierno antártico) que influyen significativamente en el comportamiento del nivel del mar.

Finalmente, se realizó el diseño de un sistema de alerta temprana de la Ensenada Guayaquil Antártica considerando que la Antártica y su océano circundante es uno de los mayores almacenes de calor y carbono. Por ello, es crucial disponer de una aplicación que facilite datos históricos tanto de variables atmosféricas como variables oceanográficas, soluciones viables y conjuntamente fortalecer la capacidad de respuesta ante posibles desastres naturales como inundaciones en zonas costeras a escala global, altos índices de salinización en océanos, eventos extremos de El Niño oscilación (ENOS) y ciclones tropicales. Además de promover el aprendizaje colectivo a través de la participación activa de profesionales especialistas, autoridades locales y comunidad en general.

## **6.2 Recomendaciones**

Las entidades gubernamentales e instituciones de servicio hidrográfico como el INOCAR deberían trabajar en conjunto con las instituciones de educación superior en la promoción de proyectos investigativos que motiven a los estudiantes o profesionales especialistas en llevar a cabo investigaciones relacionadas a la variabilidad climática y cómo repercute negativamente en zonas vulnerables e importantes como la Antártida. Adicionalmente, brindar los recursos necesarios como información actualizada que permita la recopilación de datos más consistentes con la realidad.

Es aconsejable que para este tipo de investigaciones de análisis estadístico se apliquen modelos de predicción que reflejen un bajo margen de error  $<0.5$ . Por otra parte, sería recomendable que en futuras investigaciones se incluya el análisis de las fases lunares respecto al nivel del mar, ya que la atracción gravitacional que ejerce la luna influye en el comportamiento de las mareas y variaciones cíclicas de la altitud del mar.

Se sugiere que se establezca en el territorio ecuatoriano un sistema de alerta temprana que contemple tecnología de comunicación avanzada, con la finalidad de

establecer mejoras constantes para el futuro. Asimismo, es fundamental forjar alianzas con entidades gubernamentales y no gubernamentales (privadas) para mejorar el diseño y desarrollo del SAT para los diversos desastres naturales que se puedan acontecer a futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, C., y Ruiz, J. (2021). *Variabilidad estacional e interanual de la temperatura superficial del mar en el Golfo de Urabá*. [Trabajo de grado, Universidad de Antioquía]:  
[https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/20845/2/AlvarezCristian\\_2021\\_VariabilidadTemperaturaMar.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/20845/2/AlvarezCristian_2021_VariabilidadTemperaturaMar.pdf)
- Anadón, R., Duarte, C., y Fariña, C. (2005). *Impactos sobre los ecosistemas marinos y el sector pesquero*. Impactos del Cambio Climático en España, Capítulo 4: [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/04\\_eco\\_marino\\_y\\_pesquero\\_2\\_tcm30-178495.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/04_eco_marino_y_pesquero_2_tcm30-178495.pdf)
- Brown, A. (2015). *Ocean currents*. <https://slideplayer.com/slide/4330215/>
- Bruun, P. (1954). *Coast erosion y the development of beach profiles*, en *Beach Erosion Technical*. Centro de Investigación y Desarrollo de Ingenieros de la Junta de Erosión de Playas (EE. UU.). <http://hdl.handle.net/11681/3426>
- Budimir, M., Uprety, D., Aréstegui, M., y Svensson, A. (2021). *¿Cómo se construye un sistema de alerta temprana eficiente?* Info Inundaciones: <https://practicalaction.org/early-warning-systems-saving-lives-and-building-disaster-resilience/>
- Celdrán, Y. (2023). *Las ondas de Rossby, descubre cómo se forman y por qué son tan importantes*. Meteored: <https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/que-son-las-ondas-de-rossby-los-vehiculos-que-circulan-por-el-sistema-climatico-terrestre.html#:~:text=Las%20ondas%20de%20Rossby%2C%20llamadas,d e%20ondas%2C%20dirigiendo%20las%20ondulaciones.>
- Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño. (2022). *Centro Regional del Clima para el oeste de Sudamérica [CRC OSA]*. [https://l.facebook.com/l.php?u=http%3A%2F%2Farc-osa.ciifen.org%2F%3Ffbclid%3DlwZXh0bgNhZW0CMTAAAR3C4jufvUCo5Cld52zwK0Vb603SiIQb5vJUtfvHq9iz9LxKjLzcycle\\_kQw\\_aem\\_Ah6RLFpckhiydNdGfrBRfA&h=AT0rnbt4tBhfxw11exX5hsGkkiu0WBf9YsFl0hoOfAcuzsAj1u6UONo6mbtg7xFvW7LDIKh](https://l.facebook.com/l.php?u=http%3A%2F%2Farc-osa.ciifen.org%2F%3Ffbclid%3DlwZXh0bgNhZW0CMTAAAR3C4jufvUCo5Cld52zwK0Vb603SiIQb5vJUtfvHq9iz9LxKjLzcycle_kQw_aem_Ah6RLFpckhiydNdGfrBRfA&h=AT0rnbt4tBhfxw11exX5hsGkkiu0WBf9YsFl0hoOfAcuzsAj1u6UONo6mbtg7xFvW7LDIKh)
- Cerdeira, S., Melo, N., Müller, F., y Pérez, R. (2000). Estudio comparativo de la temperatura superficial del mar detectada vía satélite y por mediciones in situ

- al norte de Cuba y NE de la península del Yucatán. *ResearchGate*, 60(2000), 66-72. [https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Cerdeira-Estrada/publication/270570125\\_Estudio\\_comparativo\\_de\\_la\\_Temperatura\\_Superficial\\_del\\_Mar\\_detectada\\_via\\_satelite\\_y\\_por\\_mediciones\\_in\\_situ\\_al\\_Norte\\_de\\_Cuba\\_y\\_NE\\_de\\_la\\_Peninsula\\_de\\_Yucatan/links/54ad8cbc0cf](https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Cerdeira-Estrada/publication/270570125_Estudio_comparativo_de_la_Temperatura_Superficial_del_Mar_detectada_via_satelite_y_por_mediciones_in_situ_al_Norte_de_Cuba_y_NE_de_la_Peninsula_de_Yucatan/links/54ad8cbc0cf)
- Church, J., Aarup, T., Woodworth, P., Wilson, W., Nicholls, R., R. R., . . . Lowe, J. (2010). Capítulo 13 de Understanding Sea Level Rise- Synthesis and Outlook for the Future. Programa Mundial de Investigaciones Climáticas de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO. Aumento y variabilidad del nivel del mar: resumen para responsables de políticas: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000189369\\_spa.locale=es](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000189369_spa.locale=es)
- Código Orgánico del Ambiente. (2017). [https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO\\_ORGANICO\\_AMBIENTE.pdf](https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf)
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). Ecuador: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. [https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador\\_act\\_ene-2021.pdf](https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf)
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (1992). <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Convención para la Conservación de Recursos Vivos Marinos Antárticos. (1982). <https://www.ciencia.gob.es/dam/jcr:9248e613-11c6-4ddb-b4b6-eb9adf59969e/CCRVMA.pdf>
- Decreto Ejecutivo No. 990. (2014). *Políticas Nacionales Oceánicas y Costeras*. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu183737.pdf>
- Del Salto, M., Fuentes , J., y Del Salto, J. (2018). Homogenización y análisis del comportamiento mensual durante la época seca de la Temperatura Superficial del Mar territorial y región insular del Ecuador usando la base de datos UKMO. 22, pp. 55-66. Acta Oceanográfica del Pacífico. <http://hdl.handle.net/1834/14996>
- Díaz, O., Mitrani, I., y Alberteris, M. (2004). Estudio del comportamiento de los flujos turbulentos de interacción Océano - Atmósfera en los mares cercanos a Cuba. *Geografía Física*. <http://repositorio.geotech.cu/xmlui/handle/1234/1729>

- Díaz, O., Zavala, J., Douillet, P., Contreras, A., Fichez, R., Grenz, C., y Denis, L. (2019). Changes in the flooding area due to storm surge under climate change in an. *Atmósfera*, 33(2). <https://doi.org/10.20937/ATM.52702>
- Doornkamp, J. (1990). *The Greenhouse Effect and Rising Sea Levels in the UK: Including a Selection of the Papers Presented at the MAFF Conference for River and Coastal Engineers, Loughborough 11-13th July 1989*. Universidad de Indiana. <https://books.google.com.ec/books?id=OTY5uoZviYAC>
- Echevarría, D., Vallès, I., y Pelegrí, J. (2022). El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. En *El sistema océano-atmósfera como colector y distribuidor de calor*. [https://digital.csic.es/bitstream/10261/255517/2/Orue\\_et\\_al\\_2022\\_cast.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/255517/2/Orue_et_al_2022_cast.pdf)
- Eoportal. (2012). *Jason-2/OSTM*. <https://www.eoportal.org/satellite-missions/jason-2#eop-quick-facts-section>
- Estrada, C. (2013). Estudio de la variabilidad del nivel del mar en la Antártida. En *Bitácora Hidrográfica*. Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú. <http://hdl.handle.net/1834/42337>
- Europa Press. (2017). *Ondas Kelvin están fundiendo el hielo marino en la Península Antártica*. <https://www.europapress.es/ciencia/cambio-climatico/noticia-ondas-kelvin-estan-fundiendo-hielo-marino-peninsula-antartica-20170719124423.html>
- Fraile, P. (2011). *Análisis de las problemáticas asociadas a la espacialización, evolución y representación de niveles del Mar presentes y Futuros en Andalucía*. [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla]: <http://hdl.handle.net/11441/15195>
- Fraser, C., Hulbe, C., Stevens, C., y Griffiths, H. (2020). *Un océano singular: la riqueza ecológica del Antártico y su importancia para el clima global*. The Conversation: <https://theconversation.com/un-oceano-singular-la-riqueza-ecologica-del-antartico-y-su-importancia-para-el-clima-global-151503>
- Fuenzalida, R., Schneider, W., Garcés, J., y Bravo, L. (2008). Satellite altimetry data reveal jet-like dynamics of the Humboldt Current. *Journal of Geophysical Research*, 113. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1029/2007JC004684>
- Goharnejad, H., Shamsai, A., y Hosseini, S. (2013). Vulnerability assessment of southern coastal areas of Iran to sea level rise: evaluation of climate change

- impact. *Oceanología*, 55(3), 611-637.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.5697/oc.55-3.611>
- González, F. (2013). *Modelización estadística de eventos extremos de oleaje y nivel del mar*. [Tesis doctoral, Universidad de las Palmas de Gran Canaria]: <http://hdl.handle.net/10553/11243>
- González, J. (2020). *Intercambio de agua superficial entre la plataforma continental y la región profunda del golfo de México*. [Tesis de posgrado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]: [https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3284/1/Tesis\\_Joana%20Julieta%20Gonzalez%20Rej%C3%B3n\\_05%20ago%202020.pdf](https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3284/1/Tesis_Joana%20Julieta%20Gonzalez%20Rej%C3%B3n_05%20ago%202020.pdf)
- González, M. (2020). *Los satélites y su utilidad en nuestro día a día*. <https://www.programainvestiga.org/pdf/guias2020-21/SATELITES.pdf>
- González, M., y García, I. (2015). Análisis del comportamiento de la temperatura del mar en las estaciones 10 millas costa afuera de Manta y La Libertad de INOCAR, para los años 1992-2014. 1. Acta Oceanográfica del Pacífico. [https://www.inocar.mil.ec/web/phocadownloadpap/actas\\_oceanograficas/acta20/OCE20\\_3.pdf](https://www.inocar.mil.ec/web/phocadownloadpap/actas_oceanograficas/acta20/OCE20_3.pdf)
- Grote, S., Lösche, S., Schröder, T., y Treffeisen, R. (2018). *Tracking Change Climate Research in Polar Regions*. Head of the Climate Sciences Division at the Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research (AWI). [https://www.awi.de/fileadmin/user\\_upload/AWI/Forschung/Besondere\\_Groupen/Klimabuero/Material\\_Klimamagazin/RZ\\_AWI\\_Klimabro\\_E\\_low\\_RGB.pdf](https://www.awi.de/fileadmin/user_upload/AWI/Forschung/Besondere_Groupen/Klimabuero/Material_Klimamagazin/RZ_AWI_Klimabro_E_low_RGB.pdf)
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. [https://oursharedseas.com/wp-content/uploads/2019/11/IPCC\\_SROCC\\_2019\\_FinalDraft\\_FullReport.pdf](https://oursharedseas.com/wp-content/uploads/2019/11/IPCC_SROCC_2019_FinalDraft_FullReport.pdf)
- Gutierrez, G. (2022). *Diseño y desarrollo de un sistema de alerta temprano para prevenir los efectos del movimiento en masa en la quebrada Pedregal, Chosica – Lima*. [Tesis de posgrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/17943>

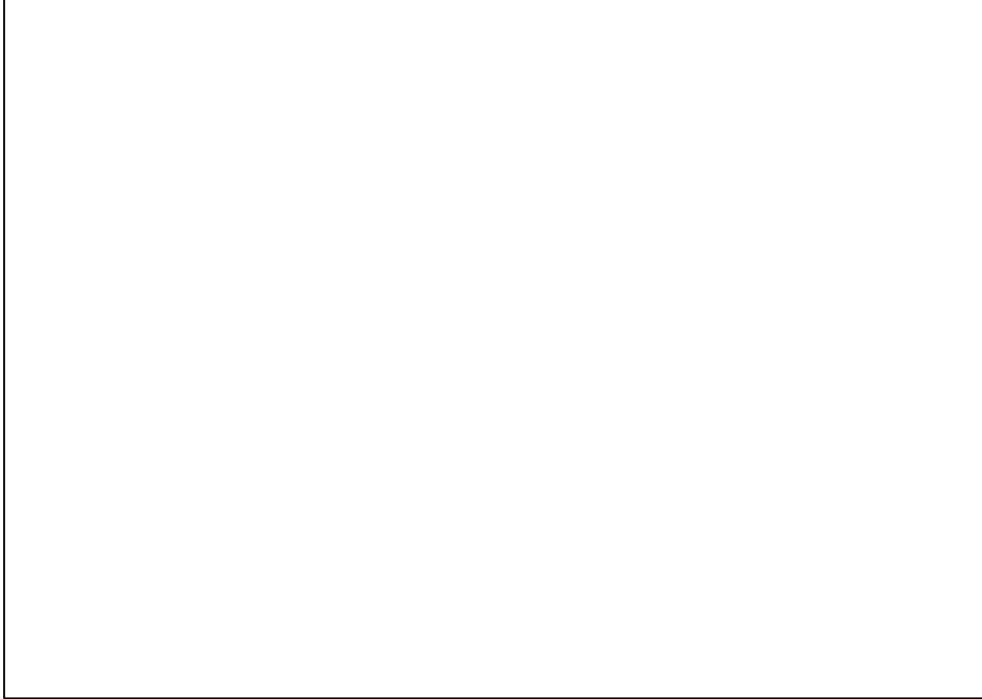
- Hernández, B. (2002). Variabilidad interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). *Marinas Valpariso*, 30, 21-31. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-71782002000200002>
- Hmong. (2002). *Jason-1*. Hmong: <https://www.jpl.nasa.gov/news/jason-1-mission-status>
- Horn, H., y Arellano, H. (1990). El sitio de instalación de la Estación Científica Ecuatoriana en la Antártida. *Acta Antártica Ecuatoriana*. Instituto Antártico Ecuatoriano. <https://aquadocs.org/handle/1834/3869>
- Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial . (2024). *¿Cuántos tipos de satélites hay?* <https://inta.es/descubre-y-aprende/es/Curiosidades/Observar-la-Tierra/tierrapregunta2/#:~:text=Los%20sat%C3%A9lites%20polares%20da n%20la,una%20vez%20cada%2024%20horas>.
- Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada [INOCAR]. (2016). *Información general: El medio natural de la Antártida*. <http://ecuadorenlaantartida.mil.ec/informacon-general/>
- IPCC. (2023). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Kim, S.-H., Shin, J., Kim, D.-W., y Jo, Y.-H. (2023). Estimation of subsurface salinity and analysis of Changjiang diluted water volume in the East China Sea. *Front in Marine Science*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1247462>
- Kuckartz, U., Rädiker, S., Ebert, T., y Schehl, J. (2013). *Statistik: Eine verständliche Einführung*. [https://books.google.com.ec/books?id=j-jJzYDh7i8C&pg=PA68&hl=es&source=gbs\\_selected\\_pages&cad=1#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=j-jJzYDh7i8C&pg=PA68&hl=es&source=gbs_selected_pages&cad=1#v=onepage&q&f=false)
- Molina, A., y Morán, J. (2023). *Afectaciones por el cambio climático en la zona marino costera del Ecuador continental en el período 2011-2022*. [Tesis de grado, Universidad Agraria del Ecuador]: [https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MOLINA%20PAREDES%20ANDREA%20PAOLA%20\(1\).pdf](https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MOLINA%20PAREDES%20ANDREA%20PAOLA%20(1).pdf)
- Mörner, N. (1986). The Concept of Eustasy: A Redefinition. *Journal of Coastal Research*, 1, 49-51. <https://www.jstor.org/stable/44863321>

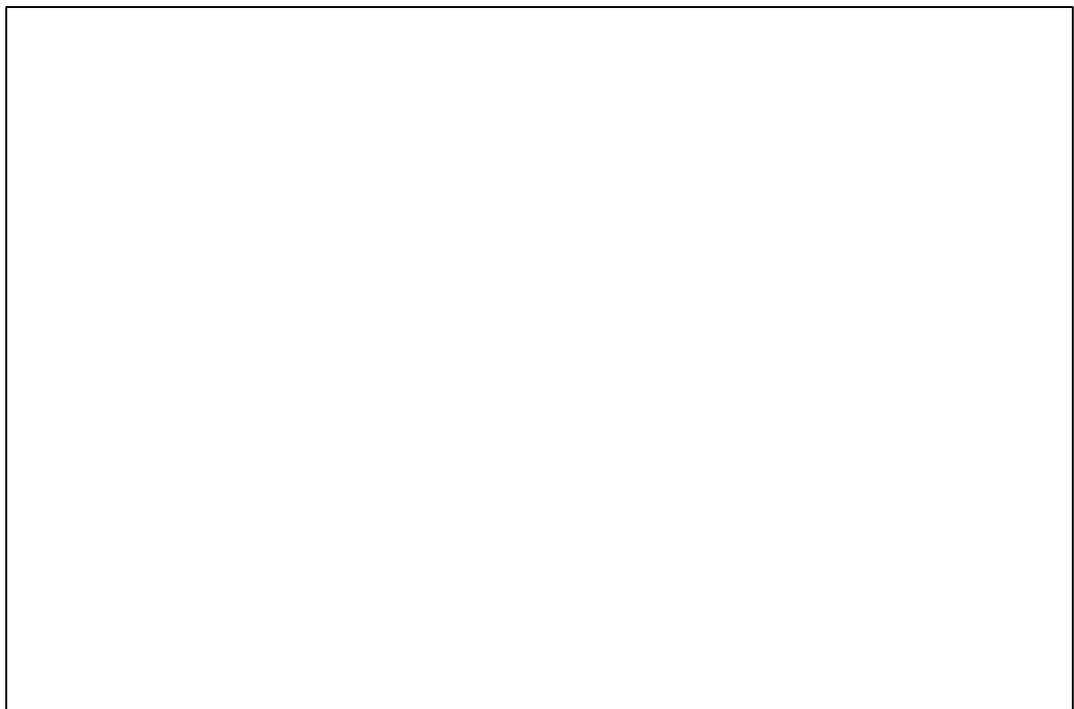
- Naciones Unidas [ONU]. (2015). *de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC)*. <https://www.refworld.org/es/leg/trat/onu/2015/es/134497>
- NASA. (1995). *TOPEX/Poseidón*. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology: [https://sealevel.jpl.nasa.gov/system/documents/files/1674\\_tp-fact-sheet.pdf](https://sealevel.jpl.nasa.gov/system/documents/files/1674_tp-fact-sheet.pdf)
- NASA. (2024). *Jasón 1*. <https://podaac.jpl.nasa.gov/JASON1?tab=mission-objectives&sections=about%2Bresources>
- NASA. (2024). *Jason 3*. <https://podaac.jpl.nasa.gov/JASON3?tab=instruments&sections=about%2Bnews%2Bresources>
- National Aeronautics and Space Administration. (2023). *Polar Operational Environmental Satellite (POES)*. <https://www.nasa.gov/goddard/earth-science-projects-division/poes/>
- National Environmental Satellite, Data, and Information Service. (2023). *Descripción general de la misión del GOES-U*. Department of Commerce National Oceanic & Atmospheric Administration: [https://www.nesdis.noaa.gov/s3dl?path=/s3/2024-01/2023\\_GOES-U\\_Mission\\_Overview\\_Fact\\_Sheet.pdf](https://www.nesdis.noaa.gov/s3dl?path=/s3/2024-01/2023_GOES-U_Mission_Overview_Fact_Sheet.pdf)
- Navedas, J. (2014). Variación en el nivel del mar como consecuencia del cambio climático global: una evaluación. *Revista Temas De Coyuntura*, 61. <https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/temasdecoyuntura/article/view/1105>
- Nevermann, H., Becerra, J., Frohle, P., y Shokri, N. (2023). Land loss implications of sea level rise along the coastline of Colombia under different climate change scenarios. *Climate Risk Management*, 39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100470>
- NOAA. (2021). *Why is the ocean salty?*. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/whysalty.html>
- NOAA. (2023). *Satélites medioambientales operativos geoestacionarios: serie R*. GOES R: <https://www.goes-r.gov/spacesegment/instruments.html>
- NOAA. (2024). *Estado operativo del POES*. <https://www.ospo.noaa.gov/Operations/POES/status.html>



- ONU. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC)*.  
<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- ONU. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*.  
<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>
- Palacios, E., Carrillo, L., Meza, S., y Ávalos, D. (2017). Variabilidad espacio temporal de la temperatura superficial del mar, en el mar Caribe. *Ra Ximhai*, 13(3), 243-265. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46154070014>
- Peck, V., Allen, C., Kender, S., McClymont, E., y Hodgson, D. (2015). Variabilidad oceanográfica en la Península Antártica Occidental durante el Holoceno y la influencia de las aguas profundas circumpolares superiores. *Reseñas de ciencias cuaternarias*, 119.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.04.002>
- Penot, J. (1998). Topex-Poseidon, medidor de los océanos.
- Periáñez, R. (2010). *Fundamentos de oceanografía dinámica*. Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla. <https://editorial.us.es/es/detalle-libro/719071/fundamentos-de-oceanografia-dinamica>
- Pinet, P. (1992). *Oceanography: An Introduction to the Planet Oceanus*. Jones & Bartlett Pub.
- Plaza, J. (2023). *Análisis de la variabilidad de la temperatura del mar y la salinidad en el período 2000-2020 en la costa Insular de Galápagos*. [Tesis de grado, Universidad Agraria del Ecuador]:  
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/PLAZA%20MERCHAN%20JAMALL%20BISMARCK.pdf>
- Randal, V. (2008). NASA. Partes del satélite Jason-2:  
<https://www.jpl.nasa.gov/missions/jason-2>
- Reglamento del Código Orgánico del Ambiente. (2019).  
<https://site.inpc.gob.ec/pdfs/lotaip2020/REGLAMENTO%20AL%20CODIGO%20ORGANICO%20DEL%20AMBIENTE.pdf>
- Reuniones de Administradores de Programas Antárticos Latinoamericanos. (1990).  
<https://www.rapal.org.ar/es/documentos-presentados>

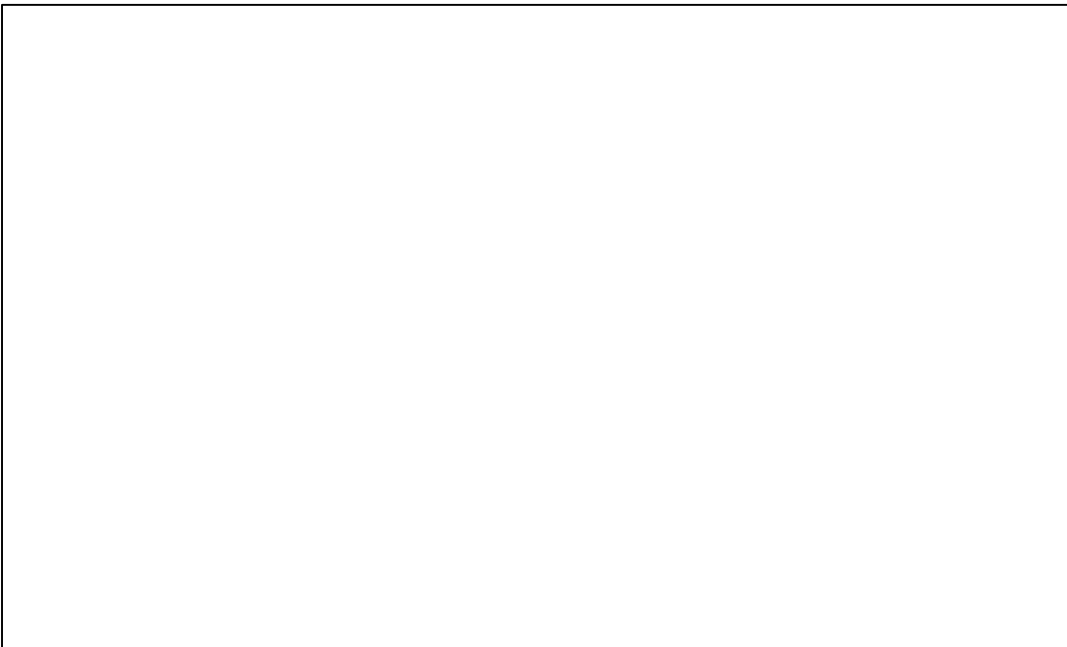
- Robert, S., y Schleyer, A. (2022). *Análisis del aumento del nivel del mar asociado a cambios en el volumen por el aporte de glaciares y mantos de hielo*. [Tesis de grado, Universidad del Norte]: <http://hdl.handle.net/10584/11459>
- Segge, S., y Mauerhofer, V. (2023). Progress in local climate change adaptation against sea level rise: A comparison of management planning between 2013 and 2022 of Swedish municipalities. *Urban Climate*, 49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101555>
- Shanmugam, G. (2020). Deep-water processes and deposits. . *Elsevier's Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489125412>
- Slott, J. (1999). *Shoreline response to sea-level rise: Examining the Bruun rule*. Nicholas School of the Environment and Earth Sciences, Duke University.
- Stephens, G., Li, J., Wild, M., Clayson, C., Loeb, N., Kato, S., . . . Andrews , T. (2012). An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. *Nature Geosci*, 5, 691–696. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/ngeo1580>
- Sugiyama, S., Minowa, M., Fukamachi, Y., y Hata, S. (2021). Subglacial discharge controls seasonal variations in the thermal structure of a glacial lake in Patagonia. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/https://www.nature.com/articles/s41467-021-26578-0>
- Tratado Antártico. (1961). [https://documents.ats.aq/keydocs/vol\\_1/vol1\\_2\\_AT\\_Antarctic\\_Treaty\\_s.pdf](https://documents.ats.aq/keydocs/vol_1/vol1_2_AT_Antarctic_Treaty_s.pdf)
- Velev, K. (2021). *Ocean Surface Topography from Space*. <https://sealevel.jpl.nasa.gov/missions/topex-poseidon/summary/>
- Wetzel, R. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2009-0-02112-6>
- Zambrano , E., y Cardin, V. (1989). Contribución al conocimiento de la oceanografía física del Estrecho Bransfield. *AquaDocs*, 1. <http://hdl.handle.net/1834/3838>
- Zazo, C. (2006). Climate change and sea level: Iberian Peninsula in a global context. *Revista C y G*, 20(3-4), 115-130. <https://www.divulgameteo.es/uploads/CC-nivel-mar.pdf>

**ANEXOS****Anexo N° 1: Figuras de Marco Teórico****Figura 29.*****Estructura vertical del océano*****Fuente: Brown, 2015****Figura 30.*****Satélite NOAA19*****Fuente: NASA, 2023**

**Figura 31.*****Instrumentos de la serie GOES-R*****Fuente: NOAA, 2023****Figura 32.*****Topex/Poseidon*****Fuente: NASA, 1995**

**Figura 33.*****Partes del satélite Jason-1***

**Fuente: NASA, 2025**

**Figura 34.*****Partes del satélite Jason-2***

**Fuente: Eoportal, 2012**

**Figura 35.**

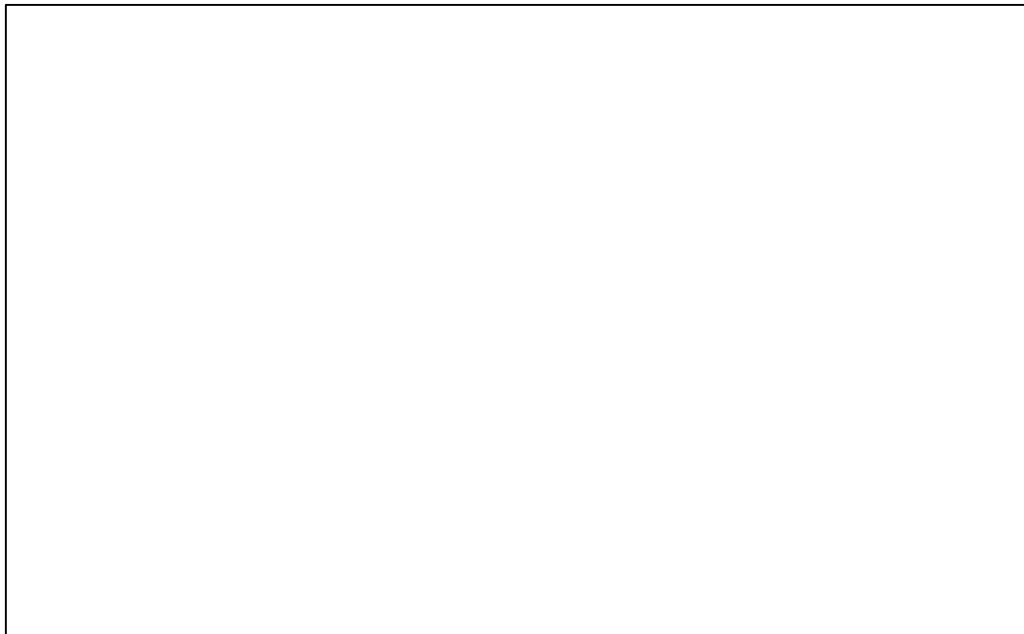
***Partes del satélite Jason-3***



**Fuente: NASA, 2025**

**Figura 36.**

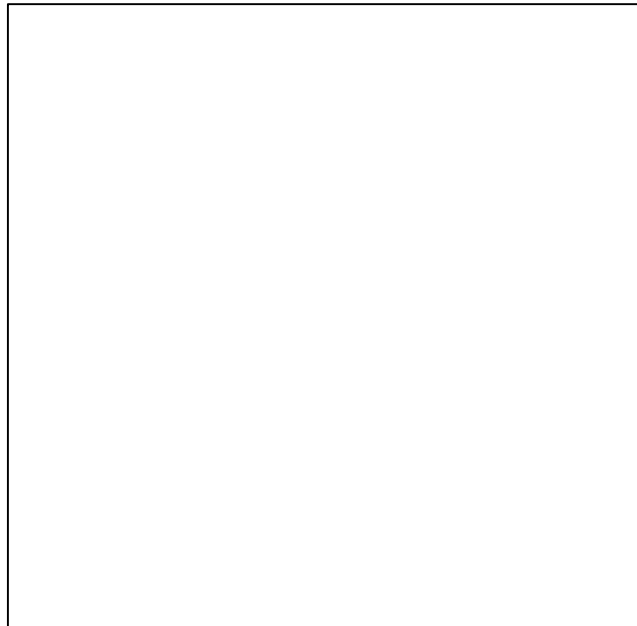
***Desarrollo de una onda Kelvin cerca de la costa de Sudamérica***



**Fuente: NOAA, 2018. Modificado por Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño [CIIFEN], 2022**

**Figura 37.**

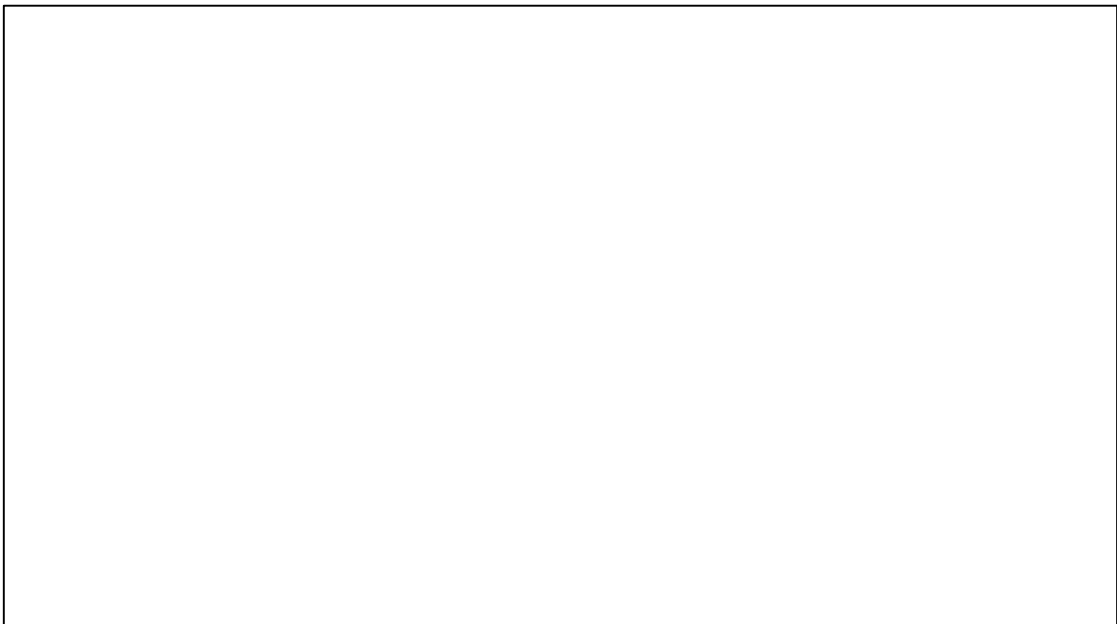
***Ondas de Rossby***



**Fuente: Celdrán, 2023**

**Figura 38.**

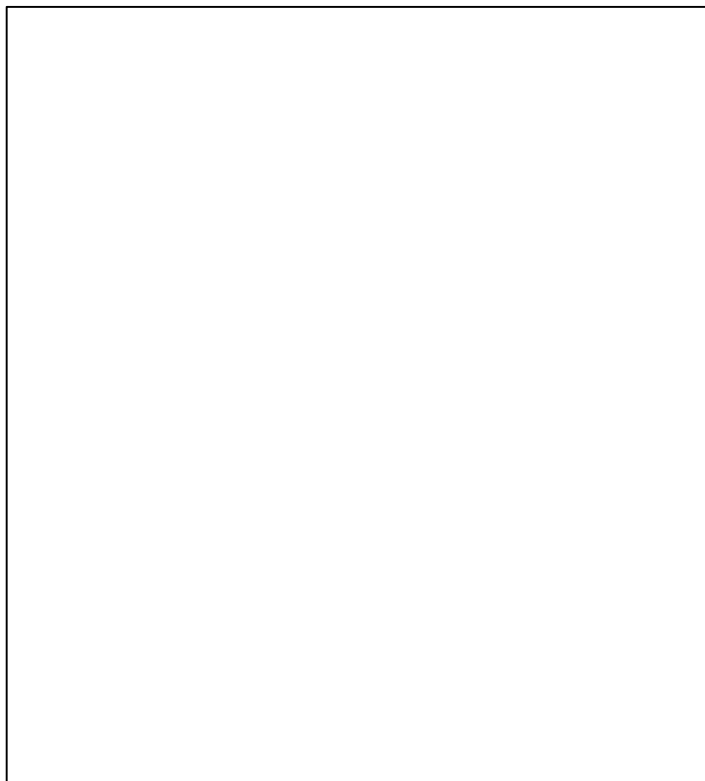
***Principales procesos que controlan el balance energético global medio anual en la Tierra***



**Fuente: Stephens et al., 2012**

**Figura 39.**

***Variaciones estacionales en las estructuras térmicas y la circulación de un lago glacial***



**Fuente: Sugiyama et al., 2021**

**Figura 40.**

***Transporte de Ekman en una surgencia costera (arriba) y hundimiento (abajo) en el hemisferio norte***

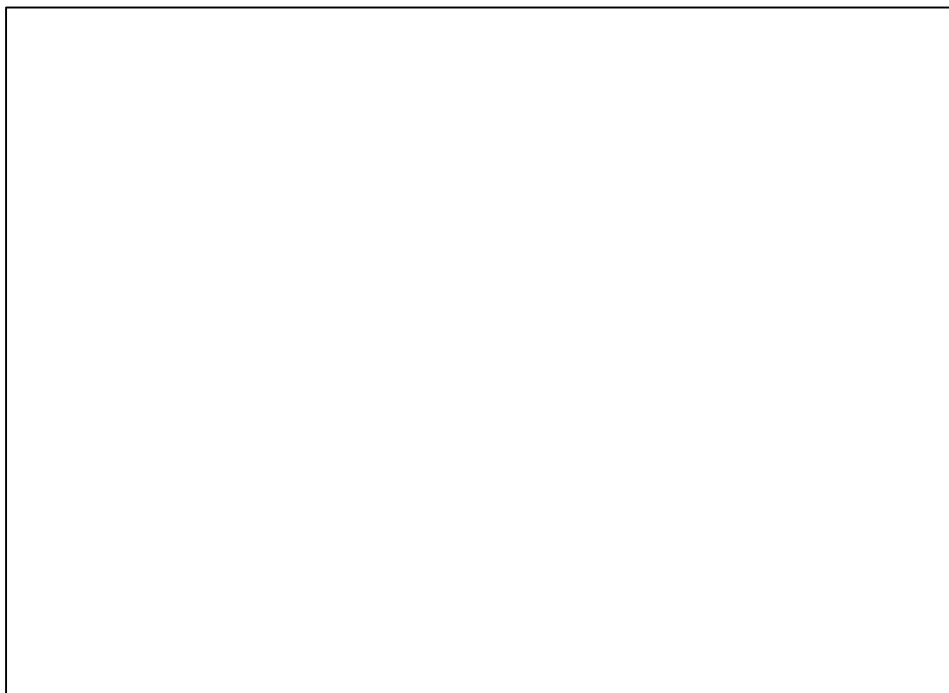


**Fuente: Wadsworth Publishing Company/ITP, 1998. Modificado por González, J (2020)**



**Figura 41.**

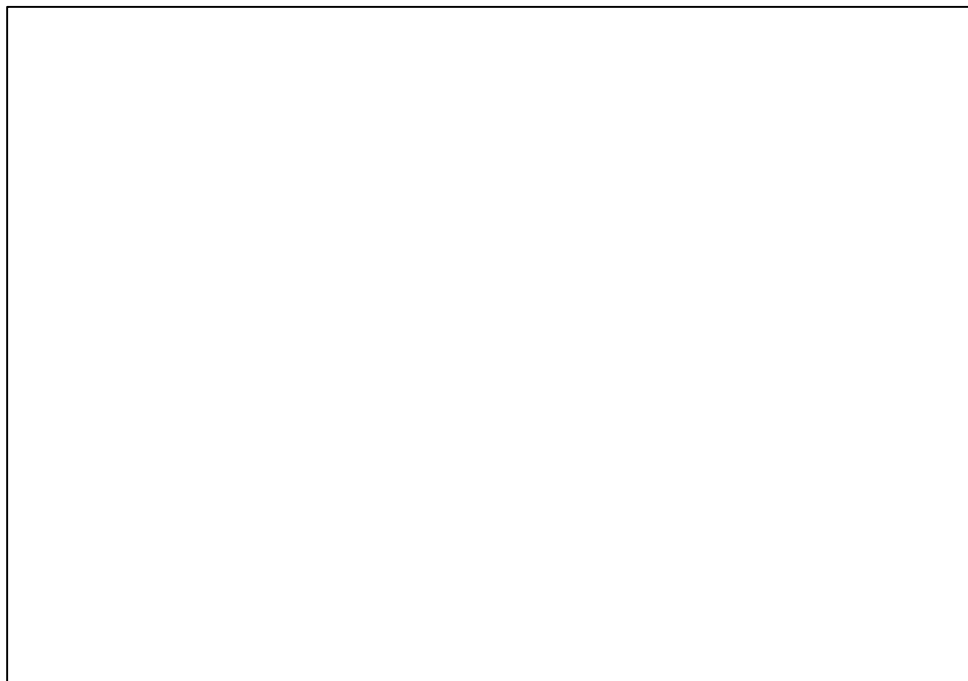
*El calor del océano amenaza las plataformas de hielo*



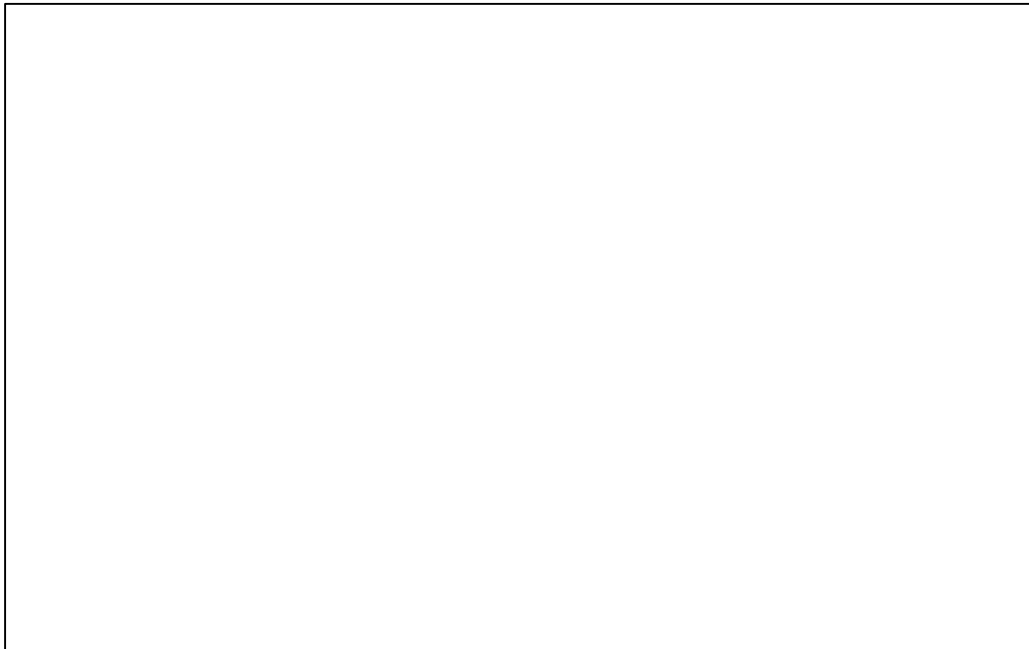
**Fuente: Grote et al., 2018**

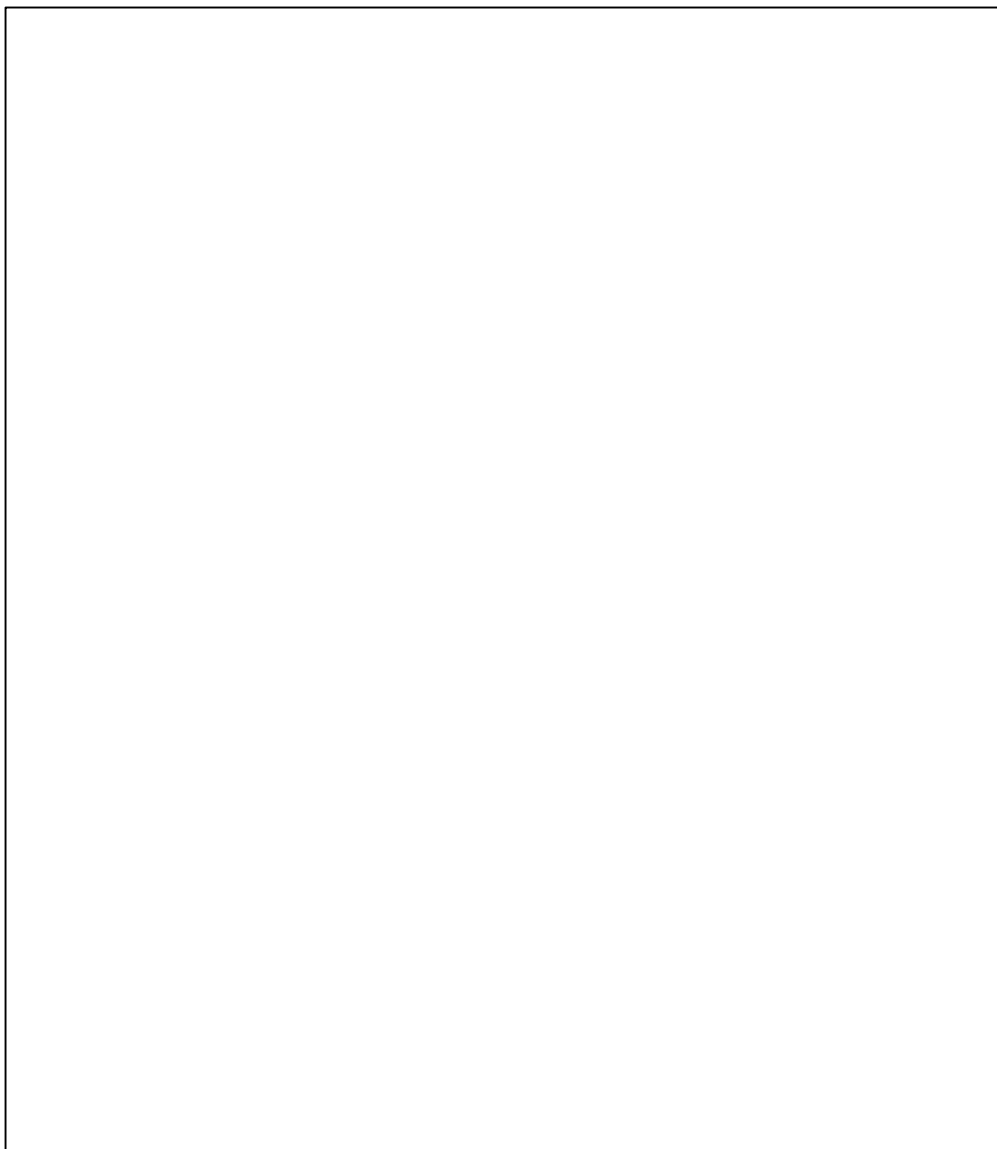
**Figura 42.**

*Cambios del nivel del mar de carácter global*



**Fuente: Fraile, 2011**

**Figura 43.*****Proceso de circulación oceánica*****Fuente: Shanmugam, 2020****Figura 44.*****Esquema de las mareas*****Fuente: Anónimo, 2017**

**Figura 45.*****Elementos de un sistema de alerta temprana eficaz según la WMO.*****Fuente: Modificado de Budimir et al. (2021)****Anexo N° 2: Tablas de Marco Teórico****Tabla 8.*****Estado operativo del POES***

<b>Astronave</b>	<b>Estado operativo</b>	<b>Estado</b>
NOAA-11, -12, -14, -16, -17	Fuera de servicio	Rojo
NOAA-15	Secundaria AM	Verde
NOAA-18	PM Secundario	Verde
NOAA-19	Misión de servicios PM Prime	Verde

**Nota. Todos los valores LTAN son válidos en 2025****Fuente: NOAA, 2025**

**Anexo N° 3: Tablas de Materiales y Métodos**

**Tabla 9.**

**Coordenadas geográficas del área de estudio**

<b>Puntos</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
1	355969	3073454
2	356369	3073261
3	356444	3072623
4	356838	3072303
5	357348	3072318
6	358112	3072770
7	358798	3073254
8	355278	3075141
9	359385	3076536
10	359385	3077101
11	358758	3077468
12	358150	3077970
13	357099	3077495
14	356237	3076284
15	355534	3075767
16	355278	3075141
17	355598	3074788
18	355717	3074386

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 4: Figuras de Materiales y Métodos**

**Figura 46.**

**Recursos, herramientas y materiales**

	<p><b>Tesis</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Grado</li> <li>•Posgrado</li> <li>•Doctorado</li> </ul>
	<p><b>Libros</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Académicos</li> <li>•Enciclopedias</li> </ul>
	<p><b>Páginas Web (Base de datos)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•PO.DAAC</li> <li>•NASA</li> <li>•NOAA</li> </ul>
	<p><b>Herramientas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Laptop</li> </ul>
	<p><b>Software</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Microsoft Office</li> <li>•RStudio - Phyton</li> <li>•Google Earth Pro</li> </ul>
<p><b>Revistas Científicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•AWI</li> <li>•IPCC</li> <li>•AQUADOCS</li> </ul>	

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 5:** Mapas mensuales de las variables atmosféricas 1993 – 2023**Tabla 10.*****Precipitación mensual desde 1993 – 2023***

---

<b>Años</b>	<b>Rásters procesados</b>
-------------	---------------------------

---

1993

1994

---

1995

1996

---

1997

1998

---

1999

2000

---



2001

2002

---

2003

2004

---

2005

2006

---

2007

2008

---

2009

2010

---

2011

2012

---

2013

2014

---

2015

2016

---



2017

2018

---

2019

2020

---

2021

2022

---

---

2023

---

**Nota.** Las imágenes ráster fueron extraídas de Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA-5 (24 km) y a su vez, se procesaron en el software QGIS

**3.40.0**

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Tabla 11.**

***Temperatura del aire mensual desde 1993 – 2023***

---

<b>Años</b>	<b>Rásters procesados</b>
-------------	---------------------------

---

1993

---

1994

1995

---

1996

1997

---

1998

1999

---

2000

2001

---



2002

2003

---

2004

2005

---

2006

2007

---

2008

2009

---

2010

2011

---

2012

2013

---

2014

2015

---

2016

2017

---



2018

2019

---

2020

2021

---

2022

2023

---

**Nota. Las imágenes ráster fueron extraídas de Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA-5 (24 km) y a su vez, se procesaron en el software QGIS**

**3.40.0**

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Tabla 12.*****Presión atmosférica mensual desde 1993 – 2023***

---

<b>Años</b>	<b>Rásters procesados</b>
-------------	---------------------------

---

1993

1994

---

1995

1996

---

1997

1998

---

1999

2000

---

2001

2002

---



2003

2004

---

2005

2006

---

2007

2008

---

2009

2010

---

2011

2012

---

2013

2014

---

2015

2016

---

2017

2018

---



2019

2020

---

2021

2022

---

---

2023

---

**Nota.** Las imágenes ráster fueron extraídas de Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA-5 (24 km) y a su vez, se procesaron en el software QGIS 3.40.0

**Elaborado por:** La Autora, 2025

**Tabla 13.**

***Velocidad y dirección del viento mensual desde 1993 – 2023***

---

<b>Años</b>	<b>Rásters procesados</b>
-------------	---------------------------

---

1993

---

1994

1995

---

1996

1997

---

1998

1999

---

2000

2001

---

2002

2003

---



2004

2005

---

2006

2007

---

2008

2009

---

2010

2011

---

2012

2013

---

2014

2015

---

2016

2017

---

2018

2019

---



2020

2021

---

2022

2023

---

**Nota. Las imágenes ráster fueron extraídas de Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA-5 (24 km) y a su vez, se procesaron en el software QGIS 3.40.0**

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Tabla 14.*****Humedad relativa mensual desde 1993 – 2023***

<b>Años</b>	<b>Rásters procesados</b>
1993	
1994	

---

1995

1996

---

1997

1998

---

1999

2000

---

2001

2002

---

2003

2004

---



2005

2006

---

2007

2008

---

2009

2010

---

2011

2012

---

2013

2014

---

2015

2016

---

2017

2018

---

2019

2020

---



2021

2022

---

2023

---

**Nota. Las imágenes ráster fueron extraídas de Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA-5 (24 km) y a su vez, se procesaron en el software QGIS**

**3.40.0**

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 6:** Mapas mensuales de las variables oceanográficas 1993 – 2023**Tabla 15.*****Temperatura superficial del mar mensual desde 1993 – 2023***

---

<b>Años</b>	<b>Rásters procesados</b>
-------------	---------------------------

---

1993

1994

---

1995

1996

---

1997

1998

---

1999

2000

---

2001

2002

---

2003

2004

---



2005

2006

---

2007

2008

---

2009

2010

---

2011

2012

---

2013

2014

---

2015

2016

---

2017

2018

---

2019

2020

---



2021

2022

---

---

2023

---

**Nota.** Las imágenes ráster fueron extraídas de Copernicus Marine Service (CMEMS) OSTIA (24 km) y a su vez, se procesaron en el software QGIS 3.40.0

Elaborado por: La Autora, 2025

**Tabla 16.**

***Salinidad mensual desde 1993 – 2023***

---

<b>Años</b>	<b>Rásters procesados</b>
-------------	---------------------------

---

1993

---

1994

1995

---

1996

1997

---

1998

1999

---

2000

2001

---

2002

2003

---

2004

2005

---



2006

2007

---

2008

2009

---

2010

2011

---

2012

2013

---

2014

2015

---

2016

2017

---

2018

2019

---

2020

2021

---



2022

2023

---

**Nota. Las imágenes ráster fueron extraídas de Copernicus Marine Service (CMEMS) SMOS (50 km) y a su vez, se procesaron en el software QGIS 3.40.0  
Elaborado por: La Autora, 2025**

**Tabla 17.*****Nivel del mar mensual desde 1993 – 2023***

<b>Años</b>	<b>Rásters procesados</b>
1993	
1994	

---

1995

1996

---

1997

1998

---

1999

2000

---

2001

2002

---

2003

2004

---

2005

2006

---



2007

2008

---

2009

2010

---

2011

2012

---

2013

2014

---

2015

2016

---

2017

2018

---

2019

2020

---

2021

2022

---



2023

---

**Nota. Las imágenes ráster fueron extraídas de Copernicus Marine Service (CMEMS) SENTINEL 3 (30 km) y a su vez, se procesaron en el software QGIS**

**3.40.0**

**Elaborado por: La Autora, 2025**

## APÉNDICE

### Apéndice N° 1: Aplicación del Marching Learning

**Figura 47.**

*Árbol de decisiones*

**Elaborado por: La Autora, 2025**