



ESTUDIO AMBIENTAL DEL POAL



BAHÍA DE ANTOFAGASTA

AÑOS 1993 AL 2023



POAL PROGRAMA DE OBSERVACIÓN
DEL AMBIENTE LITORAL
DIRECTEMAR



Índice

RESUMEN EJECUTIVO	13
1 INTRODUCCIÓN.....	15
2 OBJETIVO	16
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3 ANTECEDENTES	17
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	17
3.2 DINÁMICA OCEANOGRÁFICA.....	18
3.3 ACTIVIDADES ANTRÓPICAS EN LA BAHÍA DE ANTOFAGASTA	21
3.4 ACTIVIDADES CONTROLADAS POR LA AUTORIDAD MARÍTIMA	21
4 METODOLOGÍA	27
4.1 UBICACIÓN ESTACIONES POAL	27
4.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA ANÁLISIS.....	30
4.3 MONITOREO MATRIZ AGUA DE MAR	31
4.4 MONITOREO MATRIZ DE SEDIMENTO	33
4.5 MONITOREO MATRIZ BIOLÓGICA.....	36
4.6 ANÁLISIS DE LA INFORMACION	38
4.6.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	38
4.7 ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUA (ICA)	39
4.8 ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL PARA SEDIMENTO	42
5 RESULTADOS.....	45
5.1 MATRIZ AGUA DE MAR.....	46
5.1.1 ACEITES Y GRASAS	47
5.1.2 AMONIO.....	49
5.1.3 ARSÉNICO DISUELTO	51
5.1.4 COBRE DISUELTO	53
5.1.5 COLIFORMES FÉCALES	55

5.1.6	CROMO DISUELTO	57
5.1.7	FOSFATO	59
5.1.8	NITRATO	61
5.1.9	OXIGENO DISUELTO	63
5.1.10	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).....	65
5.1.11	ZINC DISUELTO.....	67
5.2	MATRIZ DE SEDIMENTO	69
5.2.1	ARSÉNICO TOTAL.....	70
5.2.2	CADMIO TOTAL	72
5.2.3	COBRE TOTAL.....	74
5.2.4	CROMO TOTAL.....	76
5.2.5	MERCURIO TOTAL.....	78
5.2.6	PLOMO TOTAL.....	80
5.2.7	ZINC TOTAL	82
5.2.8	MATERIA ORGNÁNICA	84
5.3	MATRIZ BIOLÓGICA.....	86
5.3.1	ARSÉNICO TOTAL.....	87
5.3.2	CADMIO TOTAL	89
5.3.3	COBRE TOTAL.....	91
5.3.4	CROMO TOTAL.....	93
5.3.5	MERCURIO TOTAL.....	95
5.3.6	PLOMO TOTAL.....	97
5.3.7	ZINC TOTAL	99
5.4	ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL COLUMNA DE AGUA	101
5.5	ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL EN SEDIMENTO	103
6	DISCUSIÓN.....	105
7	CONCLUSIONES.....	115
8	LITERATURA.....	117

TABLAS

Tabla 1: Actividades controladas por la Autoridad Marítima en la Bahía de Antofagasta hasta febrero 2025	21
Tabla 2: Categoría de las principales unidades fiscalizables identificadas como fuentes emisoras de contaminación marina presentes en la bahía de Antofagasta.	26
Tabla 3: Ubicación y características de Estaciones POAL para las matrices de agua, sedimento y biota, en la Bahía de Antofagasta.....	27
Tabla 4: Parámetros y Metodologías utilizadas en los análisis de matriz de agua de mar entre 1997-2023.....	32
Tabla 5: Parámetros y Metodologías utilizadas en los análisis de matriz sedimento entre 1997-2023.	35
Tabla 6: Parámetros y Metodologías utilizadas en los análisis de matriz biota entre 1997-2023.	37
Tabla 7: Categorías de variables ambientales en cursos de agua.	40
Tabla 8: Ecuaciones de función de las curvas para determinar el subíndice del ICA.	40
Tabla 9: Categorías y escala de valoración para las variables seleccionadas para el ICA.	41
Tabla 10: Asignación del valor de importancia o el peso de cada variable dentro del índice.....	41
Tabla 11: Rango categórico del Índice de metales en Sedimento.	43
Tabla 12: Background's de metales en la Bahía de Antofagasta.	43
Tabla 13: Rango categórico del Índice de Geoacumulación en Sedimento.	44
Tabla 14: Recomendaciones de Calidad de agua marina de normativa internacional.	46
Tabla 15: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Aceites y grasas en la matriz de agua de mar. s/d=sin dato.....	48
Tabla 16: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para el Amonio en la matriz de agua de mar.	50
Tabla 17: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Fosfato en la matriz de agua de mar.	60
Tabla 18: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Nitrato en la matriz de agua de mar.	62
Tabla 19: Recomendaciones de Calidad para sedimentos de dragados de la OMI.	69
Tabla 20: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Arsénico total en la matriz de sedimento. s/d=sin dato	71
Tabla 21: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Cadmio total en la matriz de sedimento.....	73
Tabla 22: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Cobre total en la matriz de sedimento.....	75
Tabla 23: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Cromo total en la matriz de sedimento.....	77
Tabla 24: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Mercurio total en la matriz de sedimento.....	79

Tabla 25: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Plomo total en la matriz de sedimento.....	81
Tabla 26: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Zinc total en la matriz de sedimento. s/d = sin dato.....	83
Tabla 27: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Materia Orgánica en la matriz de sedimento.....	85
Tabla 28: Normas de referencia para la matriz biológica.....	86
Tabla 29: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Arsénico total en la matriz de Biota	88
Tabla 30: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Cobre total en la matriz de Biota	92
Tabla 31: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Cromo total en la matriz de Biota	94
Tabla 32: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Mercurio total en la matriz de Biota	96

FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la Bahía de Antofagasta	17
Figura 2: Principales flujos del SCH en la bahía de Antofagasta: CPC = Corriente Perú-Chile; CCPC = Contracorriente Perú-Chile; CG = Corriente subsuperficial de Gunther; CCP = Corriente Costera del Perú; CCC = Corriente (y Contracorriente) Costera de Chile. El color rojo indica corriente caliente; azul indica corriente fría; la línea discontinua indica corriente superficial; línea continua indica corriente superficial.....	18
Figura 3: Modelo conceptual de circulación forzada por el viento y la surgencia de Bahía Antofagasta. El modelo se manifiesta en 3 fases dinámicas: I: fase inicial forzante del viento que induce surgencia y llenado de la Bahía desde el Sur; II: fase intermedia de relajación de vientos y reflujo del cuerpo de agua; III: desarrollo de zona frontal induciendo zona de retención interior y giro ciclónico de la corriente.....	20
Figura 4: Ubicación de las Unidades Fiscalizables operativas junto con la categoría del proyecto.	24
Figura 6: Ubicación de Estaciones de monitoreo de la Matriz Agua, Sedimento y Biota del POAL en Bahía de Antofagasta entre los años 1993 - 2023.	29
Figura 7: Matriz de monitoreos históricos de la Bahía de Antofagasta (1993-2023).	30
Figura 8: Diagrama general del proceso de monitoreo y análisis de información de la Matriz de agua de mar.	31
Figura 9: Diagrama general del proceso de monitoreo y análisis de la información de la Matriz de Sedimento.	33
Figura 10: Toma de muestras de sedimento en el marco del POAL. A) Se hunde tubo core abierto por ambos lados, hasta que sólo sea visible el extremo superior; B) Se pone la tapa o tapón de goma en la parte superior; C) Se ladea el tubo core y se saca sedimento; D) Debido al vacío generado, los sedimentos mantienen sus características, por lo que se gira de manera vertical para poner tapa superior; E) Se presionan fuerte ambas tapas para asegurar las muestras.	34

Figura 11: Diagrama general proceso de monitoreo y análisis de información Matriz Biota.	36
Figura 12: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo del Aceites y Grasas (mg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.....	47
Figura 13: Promedio de la concentración anual histórica de Aceites y Grasas en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.	47
A continuación, se presenta un mapa temático de la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada de Aceite y grasas, en las tres zonas definidas para el análisis.	48
Figura 14: Promedio de la concentración histórica de Aceites y Grasas por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.....	48
Figura 15: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Amonio ($\mu\text{g/L}$) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.....	49
Figura 16: Promedio de la concentración anual histórica de Amonio en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	49
Figura 17: Promedio de la concentración histórica de Amonio por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	50
Figura 18: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Arsénico Disuelto ($\mu\text{g/L}$) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.....	51
Figura 19: Promedio de la concentración anual histórica de Arsénico disuelto en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.	51
Figura 20: Promedio de la concentración histórica de Arsénico Disuelto por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.....	52
Figura 21: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cobre Disuelto ($\mu\text{g/L}$) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.....	53
Figura 22: Promedio de la concentración anual histórica de Cobre disuelto en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	53
Figura 23: Promedio de la concentración histórica de Cobre Disuelto por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	54
Figura 24: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Coliformes Fecales (NMP/100ml) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.	55
Figura 25: Promedio de la concentración anual histórica de Coliformes fecales en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.	55
Figura 26: Promedio de la concentración histórica de Coliformes Fecales por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.....	56
Figura 27: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cromo Disuelto ($\mu\text{g/L}$) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	57

Figura 28: Promedio de la concentración anual histórica de Cromo disuelto en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.	57
Figura 29: Promedio de la concentración histórica de Cromo Disuelto por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.....	58
Figura 30: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Fosfato (mg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	59
Figura 31: Promedio de la concentración anual histórica de Fosfato en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	59
Figura 32: Promedio de la concentración histórica de Fosfato por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	60
Figura 33: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Nitrato (mg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.	61
Figura 34: Promedio de la concentración anual histórica de Nitrato en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	61
Figura 35: Promedio de la concentración histórica de Nitrato por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	62
Figura 36: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Oxígeno Disuelto (mg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	63
Figura 37: Promedio de la concentración anual histórica de Oxígeno disuelto en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.	63
Figura 38: Promedio de la concentración histórica de Oxígeno Disuelto por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	64
Figura 39: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Solidos Suspendidos Totales (mg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.	65
Figura 40: Promedio de la concentración anual histórica de los Sólidos Suspendidos Totales en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.	65
Figura 41: Promedio de la concentración histórica de Solidos Suspendidos Totales por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	66
Figura 42: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Zinc Disuelto (µg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	67
Figura 43: Promedio de la concentración anual histórica del Zinc Disuelto en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	67
Figura 44: Promedio de la concentración histórica de Zinc Disuelto por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.	68
Figura 45: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Arsénico Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.	70
Figura 46: Promedio de la concentración anual histórica de Arsénico total en matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.	70

Figura 47: Promedio de la concentración histórica de Arsénico Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.....	71
Figura 48: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cadmio Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.....	72
Figura 49: Promedio de la concentración anual histórica del Cadmio total en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	72
Figura 50: Promedio de la concentración histórica de Cadmio Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.....	73
Figura 51: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cobre Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.....	74
Figura 52: Promedio de la concentración anual histórica del Cobre total en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	74
Figura 53: Promedio de la concentración histórica de Cobre Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.....	75
Figura 54: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cromo Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.....	76
Figura 55: Promedio de la concentración anual histórica del Cromo total en matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	76
Figura 56: Promedio de la concentración histórica de Cromo Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.....	77
Figura 57: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Mercurio Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.....	78
Figura 58: Promedio de la concentración anual histórica del Mercurio total en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	78
Figura 59: Promedio de la concentración histórica de Mercurio Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.....	79
Figura 60: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Plomo Total (mg/Kg) sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.....	80
Figura 61: Promedio de la concentración anual histórica del Plomo total en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	80
Figura 62: Promedio de la concentración histórica de Plomo Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.....	81
Figura 63: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Zinc Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.....	82
Figura 64: Promedio de la concentración anual histórica del Zinc total en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	82

Figura 65: Promedio de la concentración histórica de Zinc Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta	83
Figura 66: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Materia Orgánica (%) en sedimento de la Bahía de Antofagasta.....	84
Figura 67: Promedio del porcentaje (%) anual histórico de la Materia Orgánica en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.	84
Figura 68: Promedio de la concentración histórica de Materia Orgánica por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.....	85
Figura 69: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Arsénico Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.	87
Figura 70: Promedio de la concentración anual histórica de Arsénico total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	87
Figura 71: Promedio de la concentración histórica de Arsénico por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.	88
Figura 72: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cadmio Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.	89
Figura 73: Promedio de la concentración anual histórica de Cadmio total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	89
Figura 74: Promedio de la concentración histórica de Cadmio Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.	90
Figura 75: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cobre Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.	91
Figura 76: Promedio de la concentración anual histórica de Cobre total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	91
Figura 77: Promedio de la concentración histórica de Cobre Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.	92
Figura 78: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cromo Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.	93
Figura 79: Promedio de la concentración anual histórica de Cromo total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	93
Figura 80: Promedio de la concentración histórica de Cromo Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.	94
Figura 81: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Mercurio Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.	95
Figura 82: Promedio de la concentración anual histórica de Mercurio total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	95

Figura 83: Promedio de la concentración histórica de Mercurio Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.....	96
Figura 84: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Plomo Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.	97
Figura 85: Promedio de la concentración anual histórica de Plomo total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	97
Figura 86: Promedio de la concentración histórica de Plomo Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.	98
Figura 87: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Zinc Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta.....	99
Figura 88: Promedio de la concentración anual histórica de Zinc total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.....	99
Figura 89: Promedio de la concentración histórica de Zinc Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.	100
Figura 90: Índice de Calidad ambiental promedio histórico y por estación.....	101
Figura 91: ICA Espacial promedio de la Bahía de Antofagasta. ICA puntual, espacial y temporal de la Bahía de Antofagasta.	102
Figura 92: Índice de Calidad ambiental de sedimento promedio histórico y por estación.	103
Figura 93: IGE sedimento histórico 1993-2023 por estación de la Bahía de Antofagasta.	104
Figura 94: Ubicación de las Unidades Fiscalizables operativas junto con la ubicación de las estaciones de monitoreo del POAL para las matrices de agua, sedimento y biota, en el Norte de la bahía de Antofagasta.	111
Figura 95: Ubicación de las Unidades Fiscalizables operativas junto con la ubicación de las estaciones de monitoreo del POAL para las matrices de agua, sedimento y biota, en el Centro de la bahía de Antofagasta.	112
Figura 96: Ubicación de las Unidades Fiscalizables operativas junto con la ubicación de las estaciones de monitoreo del POAL para las matrices de agua, sedimento y biota, en el Sur de la bahía de Antofagasta.	113

ANEXOS

ANEXO A

Unidades Fiscalizables Bahía Antofagasta

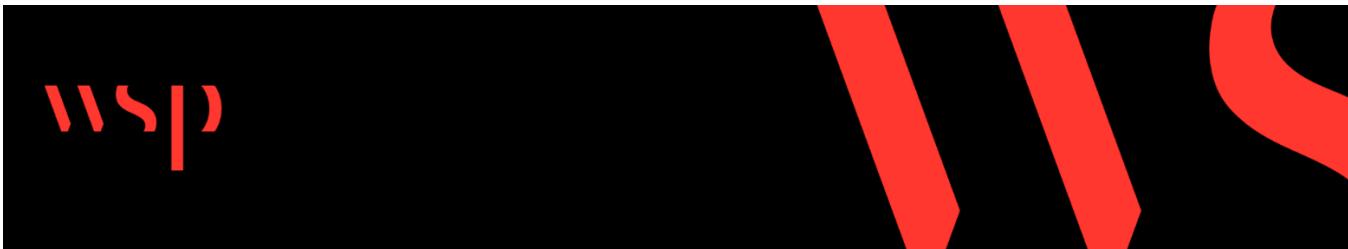
ANEXO B

DATANAM

ANEXO C

Datos Bahía de Antofagasta

Fecha Informe: Agosto 2025.



Marca Global con presencia local

Somos una consultora que trabaja de forma local a escala internacional. Con más de 60.000 profesionales expertos, estamos presente con 600 oficinas y en más de 50 países.



17

WSP llega a Chile luego de la adquisición de *Poch* firma líder en servicios de ingeniería y medio ambiente, **ConCol** consultora en energía, **Schlumberger Water Services**, expertos en gestión hídrica, *Louis Berger*, empresa con vasta experiencia en proyectos de infraestructura, autopistas y puentes. En 2021, WSP adquiere Golder, líder mundial en Minería. En 2022 suma a sus capacidades el negocio de medio Ambiente e Infraestructuras (“E&I”) de John Wood Group plc. De esta manera, WSP representa una de las redes globales de expertos más sólidas para sus clientes.

En la región somos más de 4.000 especialistas y en Chile más de 1.400 profesionales. Tenemos presencia en todo Chile, a través de nuestras oficinas de Santiago, Puerto Montt, Calama, Concepción y Valdivia.

Future Ready

Future Ready es la metodología que usamos en WSP para diseñar soluciones sostenibles y resilientes, apropiadas para los desafíos del futuro. En cada proyecto que trabajamos revisamos tendencias de clima, recursos, tecnología y sociedad, para incorporarlas holísticamente en los diseños con visión de largo plazo.

Project Delivery

Nuestros profesionales se enfocan en las prioridades que los clientes establecen para sus proyectos, gestionando los aspectos técnicos, ambientales, sociales y comerciales de éstos. Aprovechamos esta amplia experiencia para planificar y ejecutar proyectos de forma eficiente, centrándonos en los costos, los plazos, la calidad y la seguridad. Esta es nuestra propuesta para acompañarlo en su viaje, desde el desarrollo conceptual inicial hasta la entrega final del proyecto.

Equipo de trabajo

La elaboración de este informe fue realizada por el **Área de modelaciones y Estudios Ambientales** de la Oficina South Patagonia ubicada en Av. Juan Soler Manfredini 11, Torre plaza, Of. 1701, Puerto Montt, Región de Los Lagos, Chile.



PRESENTACIÓN ANAM S.A.

Análisis Ambientales S.A. (ANAM) es una empresa perteneciente al Grupo Aguas y al Grupo Veolia, que por más de 20 años ha desempeñado un rol clave en el ámbito de los análisis físicos, químicos y microbiológicos de recursos hídricos —incluyendo aguas crudas, potables, residuales y marinas— así como también en el estudio de suelos, lodos y residuos peligrosos.

El respaldo de estos prestigiosos grupos nos ha permitido incorporar tecnologías de vanguardia y mantener un proceso constante de transferencia tecnológica, lo que garantiza una mejora continua en la calidad de nuestros servicios. Gracias a ello, ANAM ofrece al mercado nacional soluciones analíticas oportunas y de alta precisión, con una infraestructura moderna y un equipo humano altamente calificado y comprometido.

Nuestro enfoque en la mejora continua y nuestra vocación por el servicio de excelencia nos posicionan como un laboratorio confiable, capaz de realizar monitoreos y recolección de muestras a lo largo de todo Chile.

Para ANAM ha sido un verdadero honor participar en el estudio de las bahías de Antofagasta, mediante la ejecución de campañas de muestreo y análisis de laboratorio, entregando datos técnicos relevantes para la caracterización ambiental.

Este informe sin duda se convertirá en una valiosa fuente de información para los sectores tanto privado, académico y público. Estamos convencidos de que este trabajo contribuirá significativamente al desarrollo de leyes, reglamentos y Normas Secundarias de Calidad Ambiental, fundamentales para la sostenibilidad y protección del medio ambiente en nuestro país.



RESUMEN EJECUTIVO

La Bahía de Antofagasta, uno de los principales focos industriales del país, tiene un fuerte componente antropogénico relacionado principalmente con la actividad minera, portuaria e industrial. Desde fines de la década de los 80's, DIRECTEMAR ha implementado el Programa de Observación del Ambiente Litoral (POAL) el cual tiene por objetivo evaluar la calidad ambiental de los principales cuerpos de agua que se encuentran bajo su jurisdicción. En este contexto, este informe denominado "Estudio Ambiental del POAL – Bahía de Antofagasta (1993-2023)" analiza la evolución ambiental de tres décadas en la bahía de Antofagasta, las que van del año 1993 al 2023, considerando parámetros medidos en la columna de agua, sedimento y biota, y evalúa la relación de estos datos con las distintas actividades antrópicas reguladas por la autoridad marítima. Entre estas, plantas de tratamiento de aguas servidas, terminales marítimos, industrias mineras, pesqueras, desaladoras, entre otras.

El POAL ha mantenido campañas bianuales de monitoreo, adaptando sus metodologías a lo largo de los años en función de avances técnicos y disponibilidad de recursos. Además, la ubicación de las estaciones de monitoreo, se han definido en base a las actividades antropogénicas que se desarrollan en el borde costero. El análisis abarca la descripción de parámetros fisicoquímicos en agua de mar, sedimento y biota, empleando índices de calidad y geoacumulación para sintetizar los resultados. Para el análisis, la bahía se divide en tres sectores (Norte, Centro y Sur), y se consideran 3 períodos de tiempo según el laboratorio a cargo de los análisis.

De los resultados más relevantes para la matriz de agua de mar, se observó que las mayores concentraciones de los parámetros se encontraron en el sector "centro", específicamente en torno al puerto de Antofagasta, donde la hidrodinámica propicia la acumulación de sustancias. Aunque en los primeros años algunos parámetros superaron las normas de referencia internacionales, la mayoría muestra una tendencia a la mejora o estabilización en las últimas campañas.

Por otro lado, la matriz de sedimento fue la que presentó los parámetros que superan mayormente las normas de referencia consideradas en el estudio, lo que evidencia una mayor vulnerabilidad de esta matriz y da cuenta de la naturaleza conservativa del sedimento. El sector del puerto concentra los mayores valores históricos, aunque en los años más recientes se observa una disminución de las concentraciones lo que se refleja en los índices de calidad del sedimento y de geoacumulación.

En el caso de la matriz de biota, a través del análisis de tejido de organismos bentónicos indicadores (chorito maico), se observaron superaciones de los límites recomendados para metales pesados, en particular de plomo, mercurio y arsénico, principalmente en los años previos al 2017. Los parámetros evaluados en biota presentan una mayor variabilidad temporal que espacial.

El índice de Calidad Ambiental (ICA) para la matriz de agua, implementado en base a Coliformes Fecales, Fosfato, Nitrato, Oxígeno Disuelto y Solidos Suspendidos, refleja una condición "Adecuada" para los períodos evaluados. Los menores valores del ICA de agua (menor calidad) se deben principalmente a las concentraciones de fosforo, y en menor medida a las

concentraciones de sólidos suspendidos totales. Este índice revela una mejora en la calidad del agua entre los años 2007-2011 y 2016-2017.

Por otro lado, el Índice de Calidad Ambiental (ICA) de Sedimento, basado en metales pesados (Cadmio, Cobre, Plomo y Zinc), señala condiciones de “Alta Contaminación” entre 1993-2019, y de “Contaminación Considerable” en 2021 y 2023, reflejando una mejora paulatina. Por su parte, el Índice de Geoacumulación (IGE) muestra una evolución significativa desde 1993 hasta 2023, con una tendencia predominante hacia una Baja Geoacumulación en los últimos años, indicando una mejora general en la calidad del sedimento.

La bahía de Antofagasta ha presentado una significativa influencia antrópica histórica, la cual se ha visto reflejada principalmente en la matriz de sedimentos y biota, sin embargo, también se puede observar una recuperación progresiva en la calidad ambiental del agua y sedimento en los últimos años. Esta recuperación puede asociarse al refuerzo normativo, la fiscalización y los avances tecnológicos desarrollados en el tiempo.

El estudio revela que es de interés asegurar la continuidad de los métodos y controles de calidad de la información que será levantada en cada campaña del POAL, ya que cambios de laboratorio y técnicas analíticas pueden dificultar la búsqueda de patrones y su posterior discusión, principalmente cuando se consideran distintos límites de detección y cuantificación.

Finalmente, el estudio permite reforzar la importancia de mantener el monitoreo constante y estandarizado, lo cual es clave para consolidar una gestión ambiental sostenible en la bahía de Antofagasta, y en este sentido, la experiencia acumulada en el POAL es un recurso fundamental para la toma de decisiones, permitiendo focalizar las acciones de mitigación y prevención, y orientando a la definición de nuevas normativas para la protección del ecosistema marino y la salud de las comunidades costeras.

1 INTRODUCCIÓN

La Bahía de Antofagasta, también denominada Bahía Moreno (Téllez & Silva, 2017), constituye uno de los principales focos industriales del país, y contiene un fuerte componente antropogénico relacionado al rubro minero como carga de concentrados de minerales polimetálicos, principalmente de cobre, zinc y plomo, la carga de ánodos y cátodos de cobre, y el intercambio de mercancías generadas en Chile y sus países vecinos (Valdés *et al.*, 2015).

El resguardo del medio ambiente se enmarca en normativas, regulaciones y vigilancias que aseguran la protección, preservación y conservación del ecosistema, existiendo mucho esfuerzo en este ámbito y en especial en temas de calidad ambiental. En este aspecto, la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) como Autoridad Marítima, ampara las competencias ambientales en el medio marino, mediante lo establecido en los artículos 5° y 142° al 162°, de la Ley de Navegación N°2.222.

Por otra parte, DIRECTEMAR desde fines de la década de los 80's, y con el objeto de dar cumplimiento a lo establecido en el Convenio y Protocolo para la protección del medio ambiente y la zona costera del pacífico sudeste (CPPS), ha desarrollado y mantenido el Programa de Observación del Ambiente Litoral (POAL). Este programa tiene por objetivo evaluar la calidad ambiental de los principales cuerpos de agua que se encuentran bajo su jurisdicción, desde Arica a la Antártica Chilena, incluyendo Isla de Pascua. Sus objetivos específicos son, evaluar la concentración de contaminantes, detectar tendencias, verificar los resultados de medidas de mitigación, configurar un sistema de alerta y generar información ambiental que permita apoyar el establecimiento y posterior fiscalización de futuras normas de calidad ambiental para la protección de usos determinados.

La información del POAL ha sido ampliamente utilizada por el sector privado, académico y público como por ejemplo en la elaboración del "Informe del Estado del Medio Ambiente (IEMA)" que lidera el Ministerio de Medio Ambiente, así como también se ha utilizado en el desarrollo de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental. A nivel internacional el POAL aportó con información referente a la construcción de los indicadores relativos al objetivo 14: "Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible" de la agenda Internacional 2030, en el marco de la ONU (DIRECTEMAR, 2021).

En este contexto, este informe presenta antecedentes asociados a la zona de estudio, junto con las actividades de las empresas emplazadas en la bahía de Antofagasta, que son controladas por la autoridad marítima, en el marco de las competencias de DIRECTEMAR; para finalmente presentar un análisis con los resultados de las campañas POAL para las matrices de agua, sedimento y biota en la bahía desde 1993 a 2023.

2 OBJETIVO

Realizar un análisis de la evolución ambiental de la Bahía de Antofagasta a partir de la información histórica obtenida de la base de datos del POAL, para las matrices de agua de mar, de sedimento y de biota en el período que va desde 1993 al 2023.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Presentar antecedentes de la bahía de Antofagasta asociados a la dinámica oceanográfica y a las actividades de empresas que son controladas por la autoridad marítima (unidades fiscalizables), en el marco de las competencias de la DIRECTEMAR.
2. Describir y analizar los parámetros obtenidos en las matrices de agua de mar, sedimento y biota, de la base de datos POAL en la bahía de Antofagasta para el período que va desde 1993 al 2023.
3. Implementar índices de calidad de agua y de sedimento para la bahía de Antofagasta.
4. Relacionar los antecedentes asociados a la oceanografía y a las unidades fiscalizables en la bahía, con los resultados de los monitoreos e índices de calidad ambiental.

3 ANTECEDENTES

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Antofagasta se encuentra bajo la Jurisdicción de La Gobernación Marítima de Antofagasta, específicamente entre Punta Jorge y Punta Coloso, entre las coordenadas 23° 30' 25" S y 70° 37' 7,9" O, y 23° 45' 33,5" S y 70° 28' 21,5" O (Figura 1). Esta bahía semicerrada se encuentra orientada hacia el sur con profundidades que alcanzan los 160 a 191 metros.

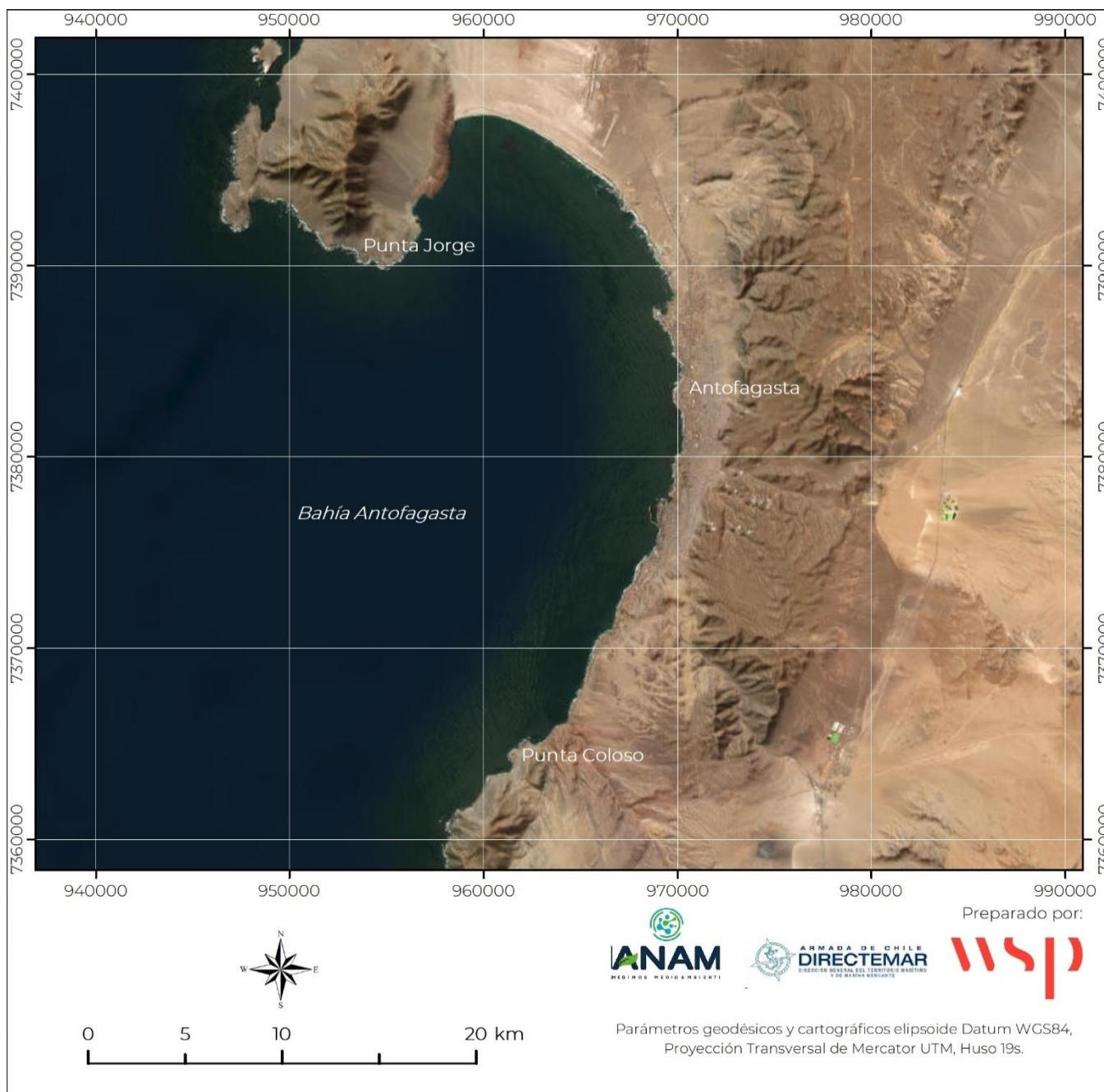
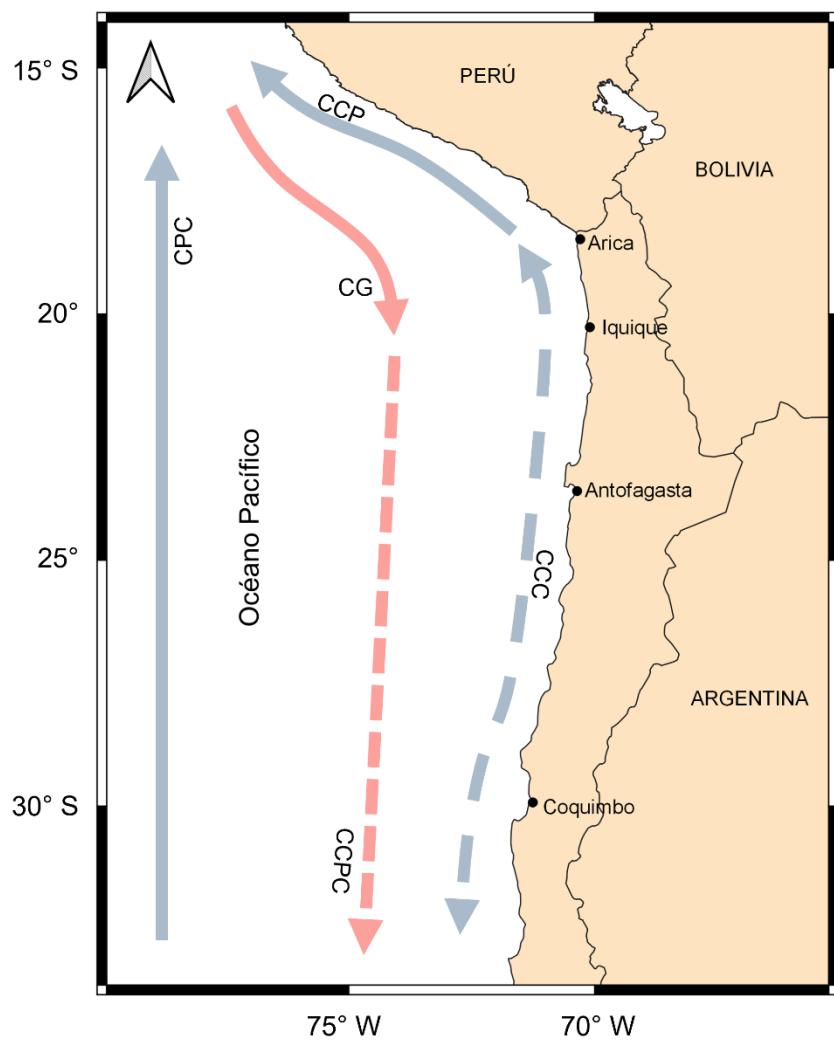


Figura 1: Ubicación de la Bahía de Antofagasta

3.2 DINÁMICA OCEANOGRÁFICA

La dinámica oceanográfica de la bahía de Antofagasta se encuentra bajo la acción directa del Sistema de la Corriente Humboldt (SCH) (Figura 2).



Fuente: WSP (2025) a partir de Escribano & Hidalgo (2001); Schneider *et al.* (2007); Karstensen & Ulloa (2018) y CEA (2020).

Figura 2: Principales flujos del SCH en la bahía de Antofagasta: CPC = Corriente Perú-Chile; CCPC = Contracorriente Perú-Chile; CG = Corriente subsuperficial de Gunther; CCP = Corriente Costera del Perú; CCC = Corriente (y Contracorriente) Costera de Chile. El color rojo indica corriente caliente; azul indica corriente fría; la línea discontinua indica corriente superficial; línea continua indica corriente profunda.

El SCH está compuesto por diversos flujos que se desplazan tanto hacia el Ecuador como hacia el polo sur. Dentro de los flujos hacia el Ecuador se encuentran el flujo oceánico denominado Corriente Perú-Chile (CPC) que se ubica aproximadamente a 1.000 km de la costa de Chile (Bernal *et al.*, 1982) y la rama oceánica de la Corriente Humboldt, localizada entre 550 a 750

km de la costa de Chile (Sievers & Silva, 1975). Cabe señalar que se ha planteado que ambas corrientes serían la misma, denominándose al flujo costero, rama costera de la Corriente Humboldt, que comprende la Corriente Costera del Perú (CCP) y Corriente Costera de Chile (CCC), relacionado con el contexto geográfico regional, y se ubica aproximadamente a 180 km de la costa de Chile (Silva & Sievers, 1981). Estos flujos hacia el Ecuador se caracterizan por transportar aguas frías y ricas en nutrientes desde latitudes australes hacia el norte, siendo especialmente relevante el aporte de aguas de surgencia a través del flujo costero, que constituye un componente clave en la productividad biológica del sistema (Karstensen & Ulloa, 2018).

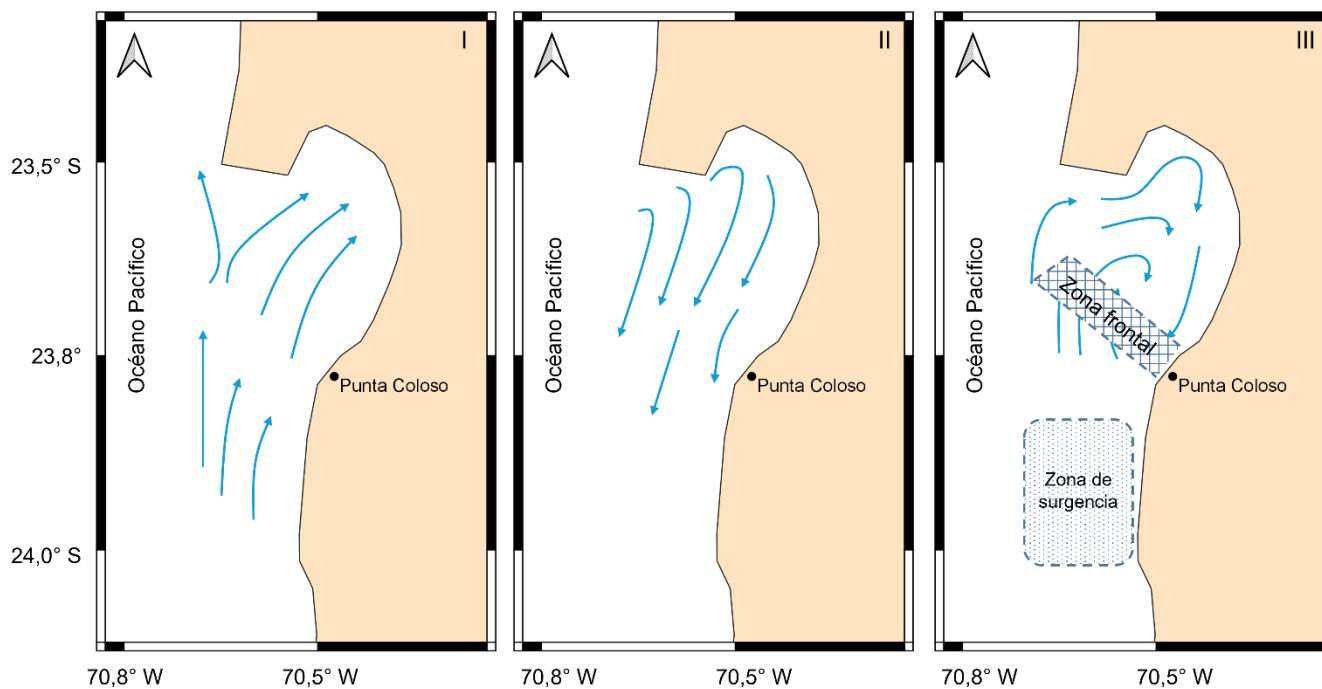
Por otra parte, los flujos hacia el polo están compuestos por la Contracorriente Perú-Chile (CCPC) localizada entre la CPC y CCC, moviéndose entre 500 a 300 km de la costa (Sievers & Silva, 1975; Bernal *et al.*, 1982); y la Corriente Subsuperficial Perú-Chile también llamada Corriente de Gunther (CG), que tienen su origen en la Corriente Subsuperficial Ecuatorial (Lukas, 1986) y se desplaza aproximadamente entre 100-300 km fuera de la costa (Strub *et al.*, 1995). La CCPC es más pronunciada frente a las costas peruanas y transporta agua cálida y salina de origen ecuatorial hacia el polo (Karstensen & Ulloa, 2018).

En términos estacionales, existen algunas diferencias en la circulación a gran escala. Durante el invierno (junio/agosto), la CCPC hacia el polo, interactúa con la CCC hacia el Ecuador, dando lugar a corrientes de inversión cerca de la costa. En verano, el flujo principal de la corriente CCC es hacia el Ecuador, forzado por vientos más fuertes del sur y suroeste (Escribano *et al.*, 2004).

A nivel local, la Bahía de Antofagasta presenta una hidrodinámica particular, condicionada por su morfología semicerrada y orientación sur. Esta configuración genera una menor intensidad de las corrientes superficiales respecto de la zona oceánica adyacente, con un efecto mareal débil. Los vientos predominantes del sur y suroeste, con intensidades promedio de 8,2 m/s en verano y 9,3 m/s en invierno, constituyen el principal forzante de la circulación local. La interacción entre el viento y la morfología costera produce un giro interno que genera una zona inercial de baja energía, favoreciendo la retención de aguas (Escribano & Hidalgo, 2001).

La circulación superficial presenta alta variabilidad y reversión en los ejes norte-sur y este-oeste, especialmente en verano, con velocidades promedio de 5,8 cm/s (norte), 3,4 cm/s (este) y 4,6 cm/s (sur). En invierno, la variabilidad disminuye, predominando la dirección sur con intensidades menores, que oscilan entre 3,9 cm/s (norte) y 2,7 cm/s (oeste) (Escribano & Hidalgo, 2001).

Escribano & Hidalgo (2001) describen un modelo de circulación en tres fases: (I) intensificación del viento sur que induce surgencia activa en el extremo sur de la bahía, llenando el sistema con aguas frías; (II) relajación de la surgencia y reversión del flujo hacia el sur, favorecida por la topografía costera; y (III) formación de un frente térmico en el sector sur que promueve una circulación ciclónica interna (Figura 3). Estudios posteriores identifican además un giro anticiclónico persistente en el extremo sur, que actúa como barrera al transporte longitudinal, limitando la mezcla entre aguas del norte y sur (Escribano *et al.*, 2004).



Fuente: WSP (2025), Modificado de Escribano & Hidalgo (2001).

Figura 3: Modelo conceptual de circulación forzada por el viento y la surgencia de Bahía Antofagasta. El modelo se manifiesta en 3 fases dinámicas: I: fase inicial forzante del viento que induce surgencia y llenado de la Bahía desde el Sur; II: fase intermedia de relajación de vientos y reflujo del cuerpo de agua; III: desarrollo de zona frontal induciendo zona de retención interior y giro ciclónico de la corriente.

La Bahía se encuentra sujeta a áreas de retención conocidas como sombras de surgencia, producto del desarrollo de frentes térmicos. Estas zonas actúan como barreras físicas altamente eficientes en la retención de partículas orgánicas e inorgánicas, así como de organismos planctónicos. Este fenómeno explica las densas agregaciones de organismos en el interior de la Bahía (Graham & Largier, 1997; Escribano & Hidalgo, 2001).

Respecto a la columna de agua, se observa una cuña de agua fría que presiona desde el sur y suroeste contra una masa cálida retenida en el interior. Esta masa cálida presenta temperaturas entre 2 y 3°C superiores a las del sector externo, patrón que se mantiene incluso durante eventos de surgencia o cambios estacionales, y que ejerce un rol importante en la retención de larvas y otros organismos (Piñones *et al.*, 2007). En cuanto a la salinidad, se presenta una menor concentración en el sector sur, con anillos de baja salinidad en los primeros 50 metros de profundidad, lo que sugiere la presencia de cuerpos de agua retenidos en la bahía (Escribano & Hidalgo, 2001).

Desde el punto de vista ecológico, la bahía mantiene una producción primaria y secundaria continua, incluso durante eventos cálidos como El Niño (Ulloa *et al.*, 2001). Este comportamiento la convierte en un sitio de alto interés biológico, albergando especies únicas como el ostión del norte (*Argopecten purpuratus*), cuyo banco natural remanente se encuentra restringido al interior de la bahía, y el tunicado *Pyura pectinifera*, con una población grande y

exclusiva en el sector. Sin embargo, dada su condición semicerrada y la creciente presión urbana e industrial de la ciudad de Antofagasta, se requiere especial atención sobre la capacidad de renovación de sus aguas y la vulnerabilidad del ecosistema frente a impactos antropogénicos (Escribano *et al.*, 2004).

3.3 ACTIVIDADES ANTRÓPICAS EN LA BAHÍA DE ANTOFAGASTA

La Bahía de Antofagasta, es una de las bahías que contiene una gran intervención antrópica en Chile, existiendo diversos usos en su Borde Costero, tales como:

1. Plantas Elevadoras de Aguas Servidas (PEAS)
2. Planta de Tratamiento Aguas Servidas
3. Terminales marítimos
4. Minerías
5. Puertos
6. Pesquerías
7. Áreas de Manejo
8. Caleta de pescadores

3.4 ACTIVIDADES CONTROLADAS POR LA AUTORIDAD MARÍTIMA

En la Tabla 1, se presentan las actividades controladas por la Autoridad Marítima en la Bahía de Antofagasta hasta febrero 2025. Para más información de las unidades fiscalizables por cada empresa del sector, ver **Anexo A**. Además, en la Figura 4, se puede observar la ubicación de cada una de las unidades fiscalizables junto con su categoría. Con el fin de mostrar más en detalle la ubicación de los proyectos, junto con ampliar los análisis de la información disponible, se distinguieron 3 sectores dentro de la bahía, los cuales corresponden a Norte, Centro y Sur.

Tabla 1: Actividades controladas por la Autoridad Marítima en la Bahía de Antofagasta hasta febrero 2025.

Proyecto	Empresa	Categoría	Fuente emisora	Descarga al mar		Estado de las instalaciones
				Si/ No	Dentro/Fuera de la ZPL	
Disposición Final de Alcantarillado de la Ciudad de Antofagasta	Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A. ECONSSA	Sanitaria	Si	Si	Fuera	En operación
Aumento de la capacidad de Manejo de Aguas Servidas de Antofagasta	Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A. ECONSSA	Sanitaria	Si	Si	Fuera	Construcción
Planta de tratamiento de aguas servidas San Pedro de Coloso	Concesionaria de Servicios	Sanitaria	Si	Si	No	En operación

Proyecto	Empresa	Categoría	Fuente emisora	Descarga al mar		Estado de las instalaciones
				Si/ No	Dentro/Fuera de la ZPL	
	Sanitarios S.A. ECONSSA					
Planta de tratamiento de aguas servidas de la Base Aérea Cerro Moreno	Base Aérea Cerro Moreno	Sanitaria	Si	Si	Dentro	En operación
Producción de semillas de ostión libre de quimioterapéuticos.	FACIMAR Universidad de Antofagasta	Centro de Cultivo Hidrobiológico	Si	Si	Dentro	En operación
Solicitud de Concesión de Acuicultura sector La Rinconada - Caleta Abtao - Bahía Moreno II (Cultivos Santa María)	Universidad de Antofagasta	Centro de Cultivo Hidrobiológico	Si	Si	No	Detenido
Instalaciones Básicas de Apoyo a la Gestión Administrativa y al Personal	Granja Marina S.A.	Centro de Cultivo Hidrobiológico	Si	Si	No	Detenido / Desmantelado
Planta desaladora de agua de mar de Antofagasta II región - Chile	Aguas de Antofagasta S.A.	Desaladora	Si	Si	Fuera	En operación
Ampliación Planta Desaladora Norte	Aguas de Antofagasta S.A.	Desaladora	Si	Si	Fuera	Construcción
Planta Desaladora Sur Antofagasta	Aguas de Antofagasta S.A.	Desaladora	Si	Si	Fuera	No construido
Planta Desalinizadora Piloto	Minera Escondida Ltda	Desaladora	Si	Si	Fuera	Detenido / Desmantelado
Lixiviación de sulfuros	Minera Escondida Ltda	Minería	Si	Si	Fuera	En operación
Suministro Complementario de Agua Desalinizada para Minera Escondida	Minera Escondida Ltda	Desaladora	Si	Si	Fuera	En operación
Terminal de embarque de ganeles minerales	Antofagasta Terminal Internacional S.A.	Puerto	No	No	No	En operación

Proyecto	Empresa	Categoría	Fuente emisora	Descarga al mar		Estado de las instalaciones
				Si/ No	Dentro/Fuera de la ZPL	
Puerto de Antofagasta	Empresa Portuaria Antofagasta	Puerto	No	No	No	En operación
Cobre en cátodos en Planta Coloso - Antofagasta	Minera Escondida Ltda	Puerto	No	No	No	En operación
Conjunto Armónico Alma Nova: Sistema de descarga de exceso de agua lluvia	Inversiones y Renta Antofagasta S.A.	Conjunto habitacional	No evaluada	-	No	En operación
Terminal Marítimo ENEX	Empresa Nacional de Energía ENEX S.A.	Terminal marítimo	No	No	No	Detenido / Desmantelado
Aguas Marítimas	CRAMSA	Sanitaria	No evaluada	-	No	En evaluación del SEIA
Mejora al Sistema de tratamiento de RILes	CYTEC Chile LTDA.	Fabril	Si	Si	Dentro	Detenido / Desmantelado
Extensión de vida útil con transición hídrica	Minera Zaldivar	Minería	No	No	No	En evaluación del SEIA
Edelnor S.A.	Central Diesel Antofagasta	Energía	Si	Si	Dentro	No construido

Fuente: Directemar adaptada por WSP (2025)

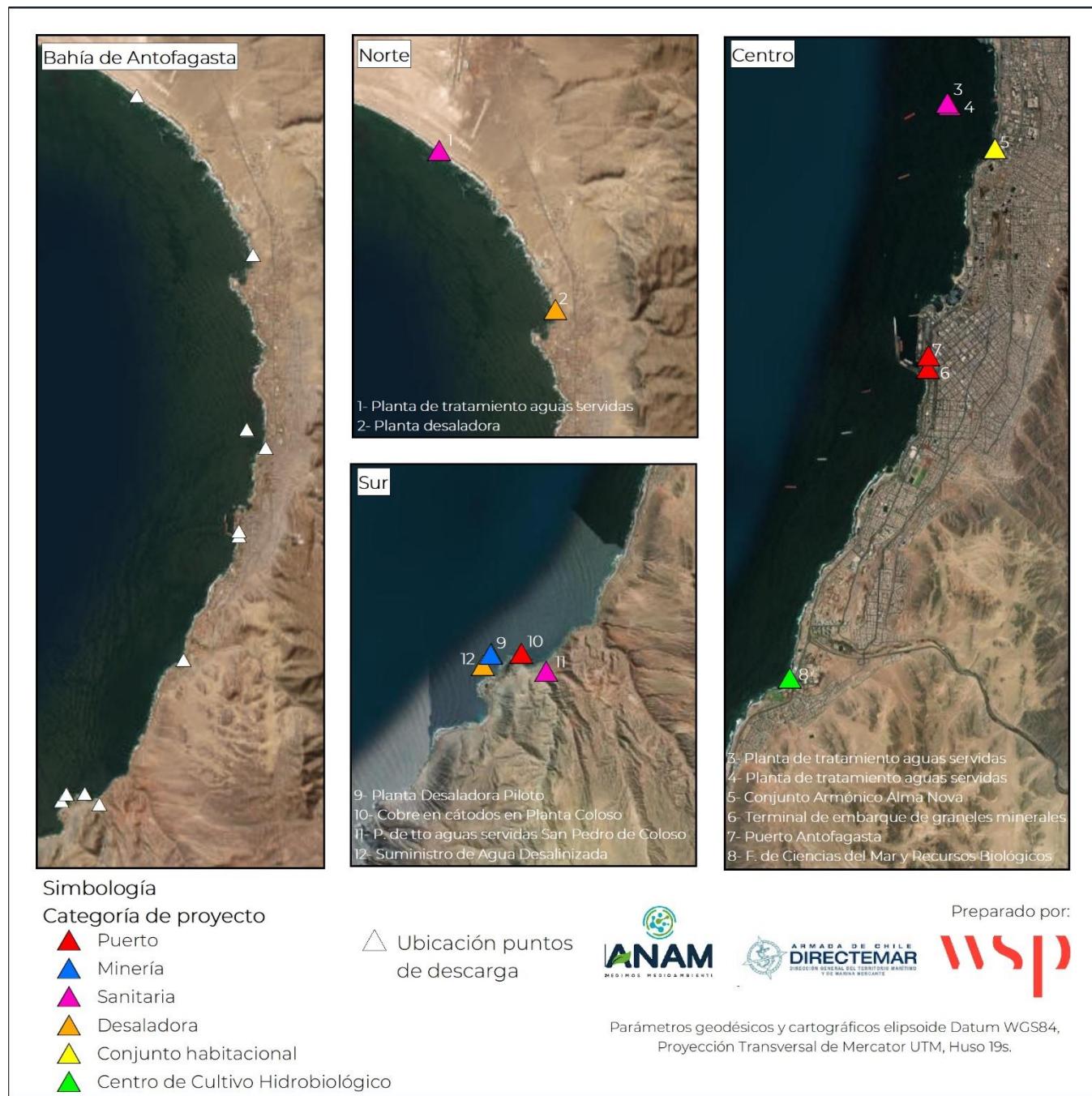
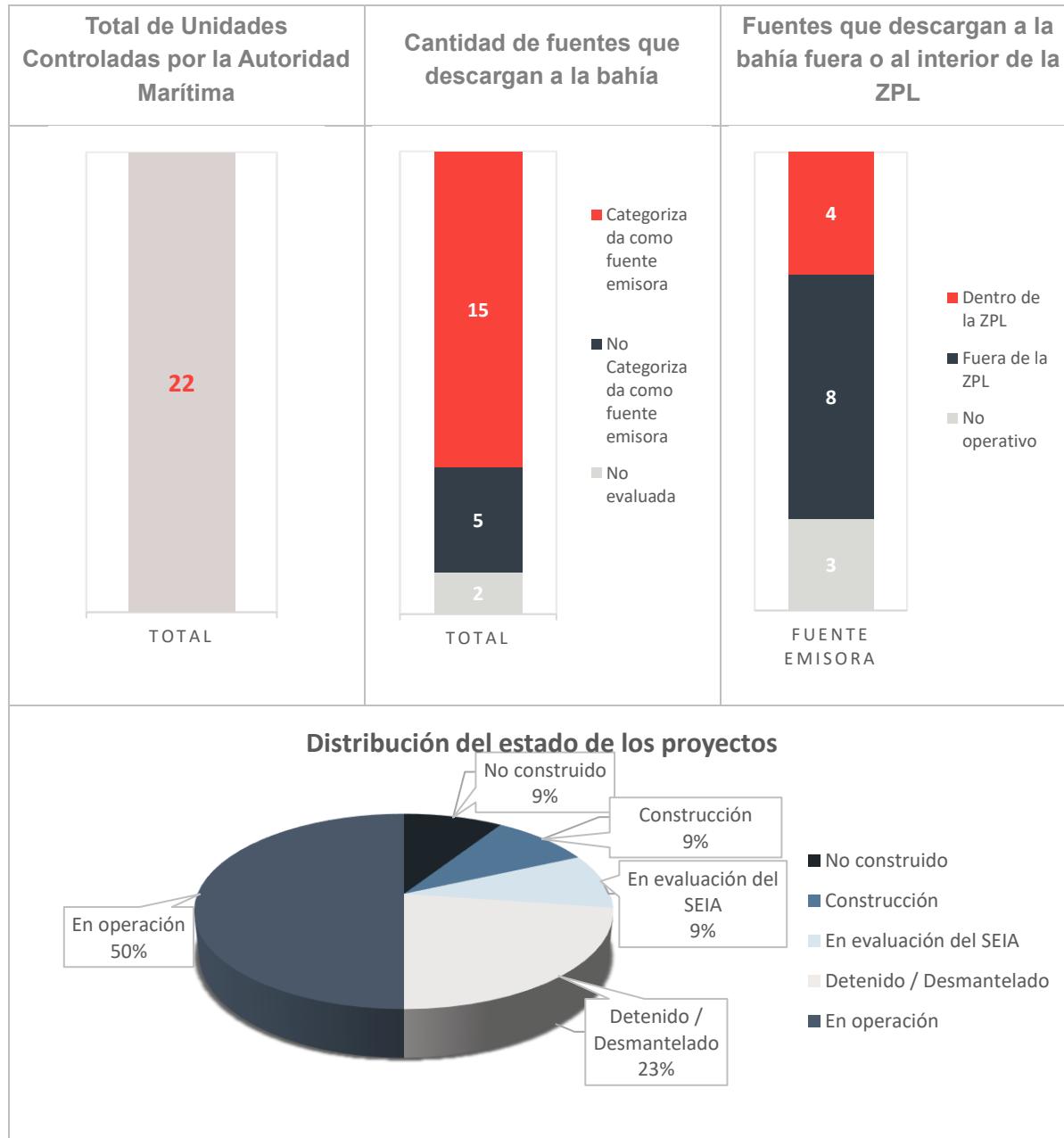


Figura 4: Ubicación de las Unidades Fiscalizables en operación junto con la categoría del proyecto.

De las 22 unidades controladas por la autoridad marítima en la bahía se identificaron 15 como fuentes emisoras con descarga al mar, de las cuales 4 descargan dentro de la zona de protección litoral (ZPL), 8 descargan fuera de esta, y 3 no se encuentran operativos (Figura 5). Un 50% de los proyectos se encuentran operativos, mientras el resto se encuentran en evaluación, construcción o detenido. Adicionalmente, existen 2 proyectos que se encuentran a

la espera de ingreso al SEIA, y solo se conocen antecedentes administrativos preliminares, estos corresponden a “Espejo de Antofagasta” y “Aguas La Negra”.



Fuente: WSP (2025)

Figura 5: Representación gráfica de las unidades fiscalizables por la autoridad marítima en la bahía de Antofagasta, según si son o no fuentes emisoras, donde descargan, y el estado de los proyectos.

Como ya fue indicado, del total de unidades fiscalizables, 15 fueron identificadas como fuente emisora. Dichas unidades se encuentran dentro de las categorías sanitaria, centro de cultivo hidrobiológico, desaladora, minería y conjunto habitacional. A continuación, en la Tabla 2 se señalan la naturaleza emisiones asociadas a dichas fuentes, y sus posibles efectos en la bahía. Es importante destacar que, de los proyectos que no reportan descargas en la bahía, los terminales marítimos y puertos podrían generar emisiones líquidas derivadas de sus operaciones, las cuales, para efectos del presente estudio, no han sido consideradas.

Tabla 2: Categoría de las principales unidades fiscalizables identificadas como fuentes emisoras de contaminación marina presentes en la bahía de Antofagasta.

Categoría fuente emisora	Principal emisión	Afecta
Sanitaria	Coliformes Fecales y Nutrientes	Salud humana / Eutrofización
Centro de cultivo hidrobiológico	Nutrientes	Eutrofización
Desaladora	Sólidos suspendidos totales y Sal	Ecosistemas acuáticos (asociado a características físicas del agua)
Minería	Metales pesados	Ecosistemas acuáticos / Salud humana
Conjunto habitacional	Aguas de subterráneo: Sólidos suspendidos totales	Ecosistemas acuáticos (asociado a características físicas del agua)

Fuente: WSP (2025)

4 METODOLOGÍA

El Programa de Observación del Ambiente Litoral (POAL), mantiene estaciones de monitoreo bianuales en la bahía de Antofagasta, consistentes en análisis químicos en las matrices agua, sedimento y biota¹. En cuanto a la data disponible para el análisis, se cuenta con registros desde el año 1993 al 2023, presentando modificaciones en el tiempo en cuanto a parámetros y metodologías de análisis. Esto último, relacionado con lo siguiente:

- Modificación de las actividades antrópicas que impactan en el cuerpo de agua.
- Consideración de los resultados previos obtenidos en el cuerpo de agua.
- Falta de metodologías analíticas apropiadas para algunos parámetros (Ej.: para hidrocarburos fijos, aceites y grasas).
- El presupuesto asociado para los monitoreos y análisis de muestras del POAL.

Cabe destacar que, en los años 2012 y 2018 no se realizaron muestreos debido a causas ajenas a DIRECTEMAR, donde se debieron extender los plazos para licitar y contratar un laboratorio acreditado para el análisis de las muestras del programa. Por otro lado, por causa mayor a raíz de la Pandemia Covid-19 durante el 2020, el POAL debió ser suspendido.

4.1 UBICACIÓN ESTACIONES POAL

La ubicación y características de las Estaciones POAL en Bahía de Antofagasta para cada matriz, se presentan en la Tabla 3 y Figura 6. Los datos están referidos al Datum WGS84. Cabe señalar que la ubicación de las estaciones de monitoreo, se han definido en base a las actividades antropogénicas que se desarrollan en el borde costero, dado que uno de los objetivos del POAL es tener el seguimiento de los principales contaminantes que se descargan a los cuerpos de agua de jurisdicción de la Autoridad Marítima, como resultado de las diferentes actividades que ahí se desarrollan. Además, con el fin de ampliar los análisis de la información disponible, se distinguieron 3 sectores dentro de la bahía, los cuales corresponden a Norte, Centro (asociado a la zona del puerto) y Sur. Esto se detalla en la Tabla y Figura a continuación.

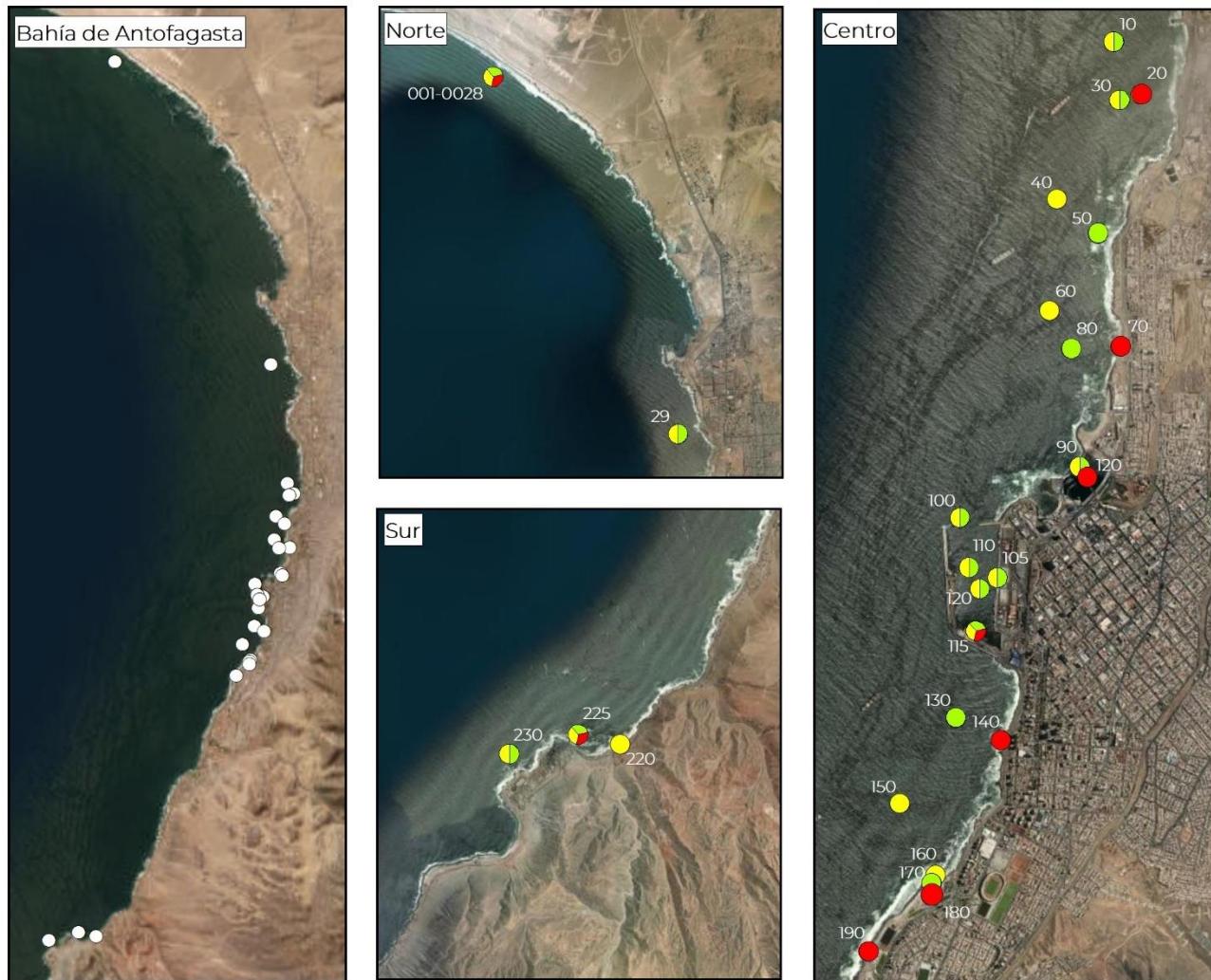
Tabla 3: Ubicación y características de Estaciones POAL para las matrices de agua, sedimento y biota, en la Bahía de Antofagasta.

Matriz	Cod. Estación	Nº Estación	Lat.	Long.	Topónimo	Sector
Agua	001-A-An	001 y 0028	23°28'55,04"	70°27'41,19"	La Rinconada-Portada	Norte
Sedimento	001-S-An					
Biota	001-B-An					
Agua	010-A-An	10	23°36'48"	70°23'52"	Emisario Planta Tratamiento Aguas Servidas (PTAS)	Centro
Sedimento	010-S-An					
Biota	020-B-An	20	23°37'00"	70°23'44"	Budeo	Centro

¹ Protocolo de Muestreo POAL. https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20210728/20210728122632/protocolo_poal.pdf

Matriz	Cod. Estación	Nº Estación	Lat.	Long.	Topónimo	Sector
Agua	029-A-An	29	23°32'34"	70°24'17"	Palnta Desaladora Norte	Norte
Sedimento	029-S-An					
Agua	030-A-An	30	23°37'02"	70°23'50"	Ex Terminal Enex	Centro
Sedimento	030-S-An					
Agua	040-A-An	40	23°37'26"	70°24'05"	Ex Terminal Esso-Codelco	Centro
Sedimento	050-S-An	50	23°37'34"	70°23'54"	Roca Abel	Centro
Agua	060-A-An	60	23°37'53"	70°24'06"	Frente Playa el Cuadro	Centro
Biota	070-B-An	70	23°38'01"	70°23'47"	Playa el Cuadro	Centro
Sedimento	080-S-An	80	23°38'02"	70°24'00"	Frente Playa el Cuadro 2	Centro
Agua	090-A-An	90	23°38'31"	70°23'57"	Poza del Salitre/Club de Yates	Centro
Sedimento	090-S-An					
Agua	100-A-An	100	23°38'44"	70°24'28"	Antepuerto	Centro
Sedimento	100-S-An					
Agua	105-A-An	105	23°38'58,06"	70°24'17,65"	Sitio 1 EPA	Centro
Sedimento	105-S-An					
Agua	110-A-An	110	23°38'56"	70°24'25"	Poza puerto – Sitio 7 ATI	Centro
Sedimento	110-S-An					
Agua	115-A-An	115	23°39'11,26"	70°24'22,86"	Sitio 5 ATI	Centro
Sedimento	115-S-An					
Biota	115-B-An					
Agua	120-A-An	120	23°39'01"	70°24'22"	Frente Muelle Histórico	Centro
Sedimento	120-S-An					
Biota	120-B-An		23°38'33"	70°23'55"		
Agua	130-A-An	130	23°39'32"	70°24'27"	Sur Puerto Antofagasta	Centro
Biota	140-B-An	140	23°39'37"	70°24'15"	Costado – Sur Puerto Antofagasta	Centro
Sedimento	150-S-An	150	23°39'53"	70°24'41"	Playa El Tatio – El Cable	Centro
Agua	160-A-An	160	23°40'10"	70°24'31"	Balneario Municipal	Centro
Sedimento	170-S-An	170	23°40'12"	70°24'32"		
Biota	180-B-An	180	23°40'15"	70°24'32"	Puntilla Norte Balneario Municipal	Centro
Biota	190-B-An	190	23°40'29"	70°24'48"	Costado Sur Balneario Municipal	Centro
Agua	220-A-An	220	23°45'25.99"	70°27'30.02"	Playa Amarilla	Sur
Agua	225-A-An	225	23°45'25,90"	70°27'52,27"	Muelle Mecanizado Coloso	Sur
Sedimento	225-S-An					
Biota	225-B-An					
Agua	230-A-An	230	23°45'36,40"	70°28'28,08"	Planta Desaladora Coloso (EWS)	Sur
Sedimento	230-S-An					

Fuente: WSP (2025)



Simbología

Definición de matriz

- Agua
- Sedimento
- Biota

- Ubicación punto de Estaciones de monitoreo



Preparado por:



Parámetros geodésicos y cartográficos elíptico Datum WGS84,
Proyección Transversal de Mercator UTM, Huso 19s.

Figura 6: Ubicación de Estaciones de monitoreo de la Matriz Agua, Sedimento y Biota del POAL en Bahía de Antofagasta entre los años 1993 - 2023.

4.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA ANÁLISIS

A continuación (Figura 7), se presenta la matriz de información disponible para las distintas estaciones monitoreadas en el tiempo, en cada una de las matrices analizadas en el programa POAL. Cada uno de los bloques indica la información contenida en cada una de las estaciones entre 1993 y 2023. La lectura de la matriz posee 4 colores de fondo: rojo para indicar que no existen datos, azul para indicar donde existen datos de columna de agua, amarillo para indicar donde existen datos de sedimento, y verde para indicar donde existen datos de biota. Además, la matriz contiene valores entre 1 y 3 que corresponde al recuento de matrices monitoreadas: (1) Solo la referente al color (columna de agua, sedimento o biota), (2) Columna de Agua y Sedimento, (3) Columna de Agua, Sedimento y Biota.

Para la lectura de la matriz, y a modo de ejemplo, la estación 001 en el año 1993 indica un bloque rojo sin valor, con lo cual su interpretación es que, la base de datos disponible no cuenta con información para esta estación en dicho periodo. Otro ejemplo sería, para la estación 020 el año 1997 podemos ver un bloque en verde con valor 1, su lectura correspondería a decir que en el año 1997 la estación 020 solo tuvo 1 matriz de medición que corresponde a Biota. Para la estación 028 en el año 2014 podemos ver un bloque azul de valor 2, su lectura corresponde a decir que en el año 2014 la estación 028 tuvo 2 matrices de medición correspondientes a Columna de Agua y Sedimento. Finalmente, para la estación 120 el año 2019 podemos ver un bloque azul con valor 3, su lectura corresponde a decir que el año 2019 la estación 120 tuvo 3 matrices correspondientes a Columna de Agua, Sedimento y Biota.

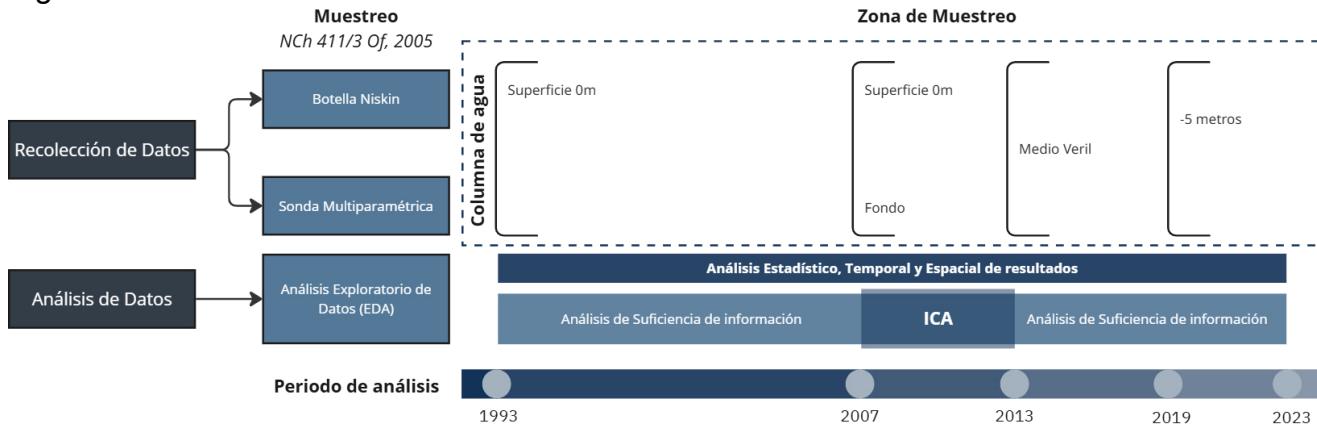
Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2021	2022	2023	
001																				1	1	1							
020						1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1		1	1	1						
028																					2	2	2	2	2	2	2	2	
029																								2	2	2	1		
030	1	1	1	1		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
050	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
060	1	1	1	1																									
070																			1										
080						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
090	1	2	2	2		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
100	2	2	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
105																								2	2	2	2		
110						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
115																								2	2	2	2		
120	1	1	1	1					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2
130	1	1	1	1																									
140	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
150						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
160	1	1	1	1																									
170						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
190						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
220																				2	2				3	2	3	3	
225																								2	2	2	2	2	
230																													

Fuente: WSP (2025)

Figura 7: Matriz de monitoreos históricos de la Bahía de Antofagasta (1993-2023).

4.3 MONITOREO MATRIZ AGUA DE MAR

El proceso de monitoreo y análisis de información de la Matriz de agua de mar se resume en la Figura 8.



Fuente: WSP (2025)

Figura 8: Diagrama general del proceso de monitoreo y análisis de información de la Matriz de agua de mar.

La toma de muestras de agua se realizó en conformidad con la NCh 411/3 Of, 2005, utilizando botellas oceanográficas tipo Niskin, las cuales fueron cebadas en cada estación de monitoreo, y limpiadas con agua potable al término de la jornada. La profundidad de la toma de muestra depende del periodo analizado. En el periodo 1993-2006, se registraron muestras superficiales a 0 m; Par el periodo 2007-2011, se registraron muestras en 2 profundidades, superficie y fondo. Para el período 2013-2017, los muestreos se realizaron a la profundidad a medio veril, es decir a la mitad de la profundidad de la estación; Para el periodo 2019-2023, se realizó a una profundidad estándar de 5 metros. Las muestras fueron almacenadas inmediatamente en neveras. Además, se tomó una muestra testigo con agua de la misma estación para verificar la temperatura sin contaminar las muestras y asegurar la cadena de frío. En tanto, la preservación de la muestra se limita a un control de pH, adición de sustancias químicas, refrigeración y la congelación.

Para las mediciones *in situ*, se debe registrar los datos de acuerdo con lo establecido en la ficha de terreno con mediciones a 0, 5 y 10 metros (matriz acuosa). Para cada terreno, se debe calibrar y verificar el estado de la sonda el mes previo a la campaña, con el objetivo de detectar fallas o errores críticos. Por otra parte, un día antes del inicio de los muestreos, se debe calibrar el instrumental “por parámetro único” con el objetivo de asegurar una correcta lectura de los datos y disminuir errores en las mediciones.

Para el análisis de este estudio, se seleccionó un conjunto específico de variables, dado que el volumen de información disponible es considerablemente amplio. Si se analizasen todas las variables que comprende la base de registros, el informe resultante sería extremadamente extenso, lo que desviaría la atención del objetivo principal: analizar la evolución histórica de la salud ambiental de la bahía. Por lo tanto, a través de un proceso de selección basado en el

juicio de experto, se evaluó cada variable en función de su relevancia para el objetivo del estudio, su capacidad para proporcionar información significativa y su relación con otras variables. También se consideraron las variables necesarias para implementar índices de calidad (entre categorías comúnmente reconocidas como: estado y demanda de oxígeno, eutrofización, aspectos de salud, características físicas) (Samboni *et al.*, 2007), y se consideró la suficiencia de información para los análisis. Este proceso permitió identificar las variables más significativas y relevantes para el estudio, asegurando que el análisis se mantuviera enfocado y eficiente.

Sin perjuicio de lo anterior, la lista completa de los parámetros monitoreados por el POAL se encuentra en Anexo C. Además, toda la información histórica de la base de datos POAL estará disponible en la plataforma DATANAM, la cual permitirá un acceso tanto a la información analizada, como a los datos disponibles para su descarga (Anexo B). Las metodologías utilizadas en los análisis, las unidades y los Límites de Detección (L.D.), de los parámetros seleccionados se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros y Metodologías utilizadas en los análisis de matriz de agua de mar entre 1997-2023.

Parámetros	Metodologías Aguas	L.D.	Año
Aceites y Grasas	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	0,1 mg/L	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	1,0 mg/L	2000
	NCh 2313 / 6. Of 1997 Extracción Soxhlet - Partición con solvente	10 mg/L	2005 - 2006
	Standard Methods Ed.21 (2005) Método 5520-B Gravimetría	5 mg/L	2007- 2011 ²
Amonio	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	20 µg/L	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	10 µg/L	2000
	Standard Methods Ed. 21, 2005. Método 4500 NH3 D. Electrodo Específico	40 µg/L	2007 - 2011
	Std Methods 4500-NH3 BD Ed.22, 2012	30 µg/L	2013 - 2017
	SM 4500-NH3 F	10 µg/L	2018 - 2023
Arsénico disuelto	Std Methods 3114 B Ed.22, 2012	0,5 µg/L	2013 - 2017
	EPA 200.8 (1994)	1 µg/L	2018 - 2023
Cobre disuelto	Std Methods 3111 C Ed.22, 2012	1 µg/L	2013 - 2017
	EPA 200.8 (1994)	2 µg/L	2018 - 2023
Coliformes Fecales	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	1,8 NMP/100 ml	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	2 NMP/100 ml	2000
	Std. Methods Ed.20 1998. 9221E. NMP	2 NMP/100 ml	2005 - 2006
	Std. Methods Ed.21, 2005. 9221E en medio EC	2 NMP/100 ml	2007 - 2011

² Aceites y grasas presenta valores bajo 5 mg/L el año 2007, por lo que el límite pudo ser distinto dicho año.

Parámetros	Metodologías Aguas	L.D.	Año
	Std Methods 9221 E Ed.22, 2012	1,8 NMP/100 ml	2013 - 2017
Cromo disuelto	Std Methods 3111 C Ed.22, 2012	1 µg/L	2013 - 2017
	EPA 200.8 (1994)	1 µg/L	2018 - 2023
Fosfato	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	0,01 mg/L	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,005 mg/L	2000
	Std. Methods Ed.20 1998, 4500- P-C. UV-VIS	0,2 mg/L	2007 - 2011
	Std Methods 4500-P E Ed.22, 2012	0,005 mg/L	2013 - 2017
	SM 4500-P E (2012)	0,5 mg/L	2018 - 2023
Nitrato	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	0,001 mg/L	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,01 mg/L	2000
	Std Methods 4500-NO3 B Ed.22, 2012	0,02 mg/L	2013 - 2017
	MQI 0000030	0,023 mg/L	2018 - 2023
Sólidos Suspendidos	Standard Methods Ed. 21, 2005. Método 2540 D Gravimetría.	5 mg/L	2007- 2011 ³
	Std Methods 2540 D Ed.22, 2012	5 mg/L	2013 - 2017

Fuente: WSP (2025)

4.4 MONITOREO MATRIZ DE SEDIMENTO

El proceso de monitoreo y análisis de información de la Matriz de sedimento se resume en la Figura 9.

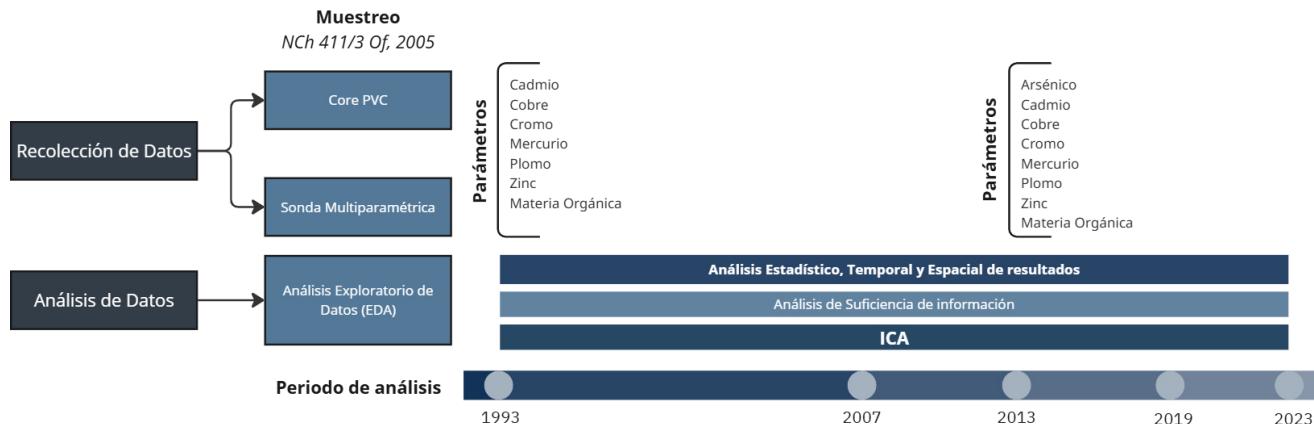
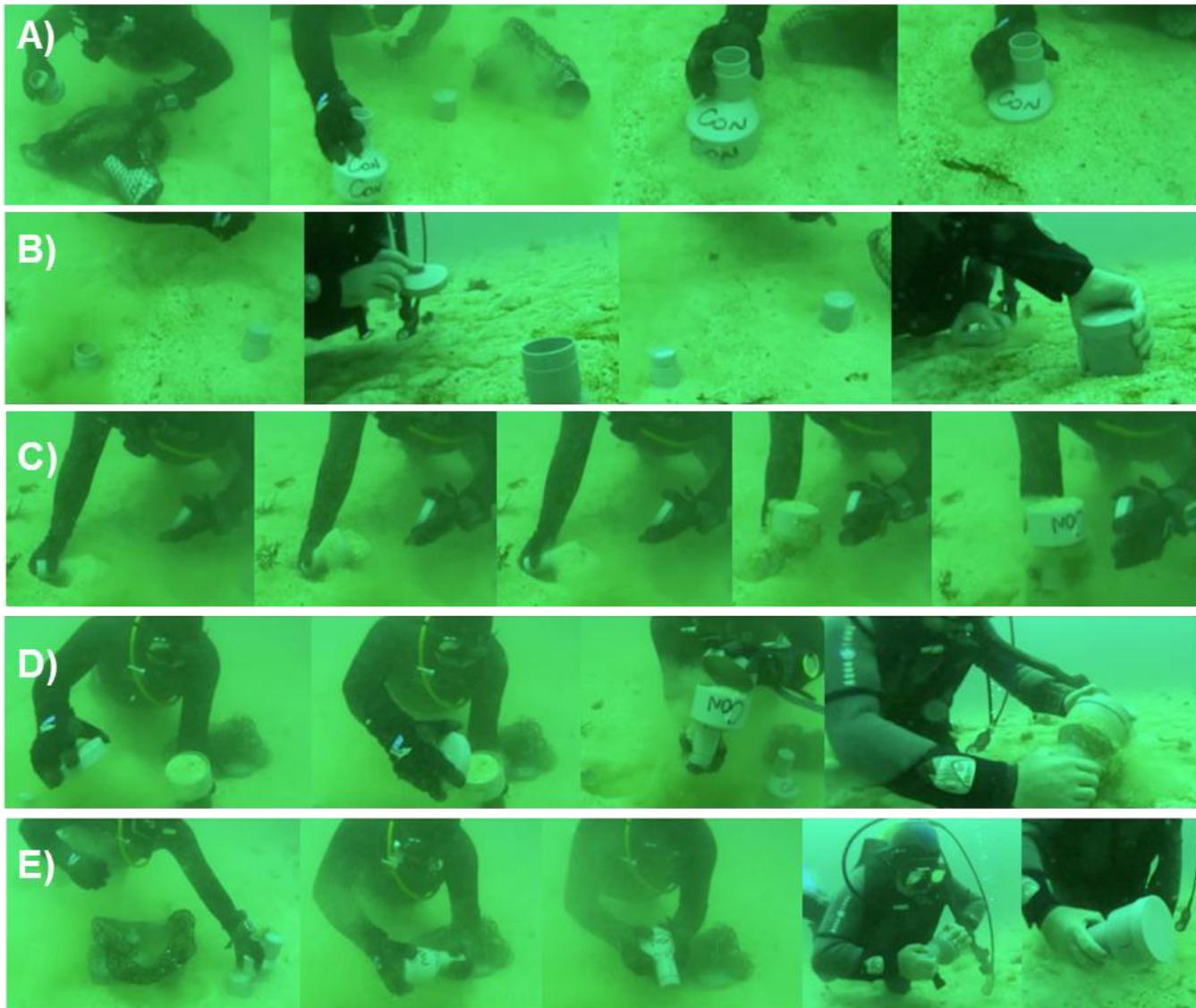


Figura 9: Diagrama general del proceso de monitoreo y análisis de la información de la Matriz de Sedimento.

El muestreo de la matriz sedimentaria se realiza mediante buceo autónomo (Figura 10) utilizando un Core de PVC para la extracción del sedimento provisto por el laboratorio, los cuales deben enjuagarse con el agua de la estación a monitorear. La toma de muestras se realiza con

³ Sólidos suspendidos presenta valores bajo 5 mg/L el año 2007, por lo que el límite pudo ser distinto dicho año.

cinco réplicas, las que deben ser lo más homogéneas posible. Las muestras de los tubos se vierten en un recipiente previamente cebado con el agua de la misma estación, procediendo a llenar los envases completamente, eliminando el agua sobrenadante.



Fuente: Protocolo POAL 2021⁴

Figura 10: Toma de muestras de sedimento en el marco del POAL. A) Se hunde tubo core abierto por ambos lados, hasta que sólo sea visible el extremo superior; B) Se pone la tapa o tapón de goma en la parte superior; C) Se ladea el tubo core y se saca sedimento; D) Debido al vacío generado, los sedimentos mantienen sus características, por lo que se gira de manera vertical para poner tapa superior; E) Se presionan fuerte ambas tapas para asegurar las muestras.

⁴ Protocolo de Muestreo POAL. https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20210728/20210728122632/protocolo_poal.pdf

Respecto a las mediciones *in situ*, se debe introducir rápidamente un material inerte de diámetro similar al sensor de ORP y temperatura para hacer espacio al sensor e introducirlos en los primeros 4 cm del sedimento y de este modo registrar las lecturas.

Las muestras son almacenadas, preservadas y analizadas, según metodologías especificadas en la Tabla 5 y enviadas al laboratorio para su análisis. Al igual que en la matriz de agua, se seleccionaron parámetros considerados relevantes para los fines de este informe de evolución ambiental, y la lista completa de los parámetros monitoreados por el POAL y sus correspondientes valores en el sedimento se encuentra en Anexo C. Además, como ya fue mencionado, toda la información histórica de la base de datos POAL estará disponible en la plataforma DATANAM.

Tabla 5: Parámetros y Metodologías utilizadas en los análisis de matriz sedimento entre 1997-2023.

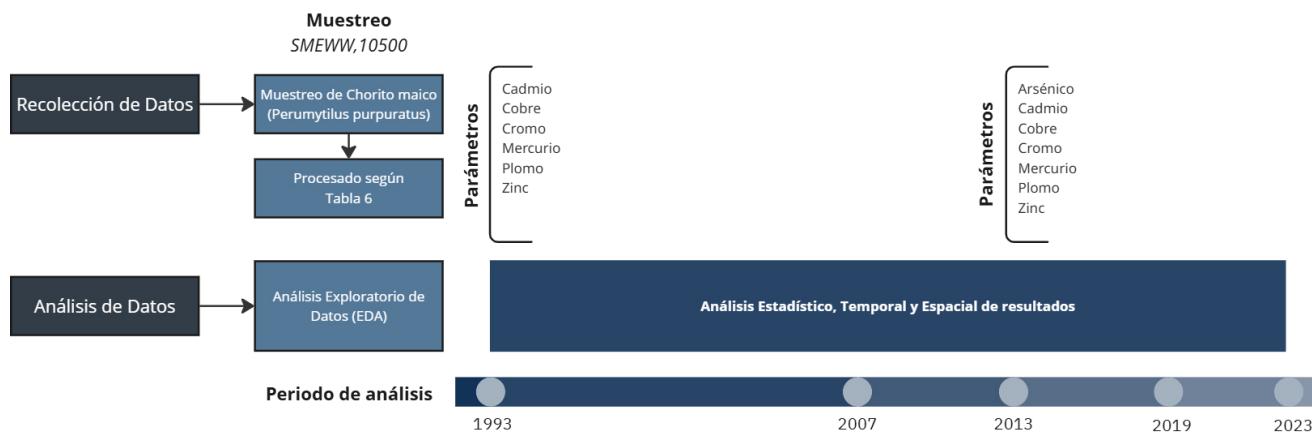
Parámetros	Metodologías Sedimento	L.D.	Año
Arsénico Total	I-ENV-LAB-116 basado en EPA 3050, SM 3114 B Ed.22, 2012.	0,1 mg/Kg	2013 - 2017
	MQI000029 Basado en SW 846 EPA 3050 B1996 y SM 3120B Ed 22 ICP-OES	1,2 mg/Kg	2018 - 2023
Cadmio Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	0,4 mg/kg	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,005 mg/kg	2000
	EPA 3050 - Standard Methods	0,1 mg/kg	2007 - 2011
	I-ENV-LAB-116 basado en EPA 3050, SM 3111 B Ed.22, 2012.	0,1 mg/kg	2013 - 2017
	SM 3120B Ed. 22° 2012	0,1 mg/Kg	2018 - 2023
Cobre Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	1,1 mg/kg	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,1 mg/kg	2000
	EPA 3050 - Standard Methods	0,1 mg/kg	2007 - 2011
	I-ENV-LAB-116 basado en EPA 3050, SM 3111 B Ed.22, 2012.	0,1 mg/kg	2013 - 2017
	SM 3120 B Ed.22 2012	1,4 mg/Kg	2018 - 2023
Cromo Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	1,65 mg/kg	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,1 mg/kg	2000
	EPA 3050 - Standard Methods	0,5 mg/kg	2007 - 2011
	SM 3120 B Ed.22 2012	2,4 mg/Kg	2018 - 2023
Mercurio Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	0,014 mg/kg	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,001 mg/kg	2000
	EPA 7471 B Espectroscopia A.A.- Vapor frío.	0,01 mg/kg	2007 - 2011
	I-ENV-LAB-110 Basado en EPA 7471 AB	0,01 mg/kg	2013 - 2017
	MQI 0000007 Rev.07	1 mg/kg	2018 - 2023
Plomo Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	0,3 mg/kg	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,1 mg/kg	2000

Parámetros	Metodologías Sedimento	L.D.	Año
	EPA 3050 - Standard Methods	0,5 mg/kg	2007 - 2011
	I-ENV-LAB-116 basado en EPA 3050, SM 3111 B Ed.22, 2012.	0,5 mg/kg	2013 - 2017
	SM 3120B Ed. 22° 2012	1,2 mg/kg	2018 - 2023
Zinc Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	1,24 mg/kg	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,1 mg/kg	2000
	EPA 3050C /Standard Methods 20th Ed. (1998)	0,5 mg/kg	2005 - 2006
Materia Orgánica	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	7*10-5 %	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,01 %	2000
	Digestión con K2Cr2O7/H2SO4/Titulación FeSO4	0,1 %	2005 - 2006
	Digestión con K2Cr2O7/H2SO4/Titulación FeSO4	0,1 %	2007 - 2011
	Subsecretaría de Pesca RES.EXE 3612. Pérdida por Calcinación.	0,1 %	2013 - 2017
	MQC000059 basado en TMECC 05.07, año 2002	0,28 %	2018 - 2023

Fuente: WSP (2025)

4.5 MONITOREO MATRIZ BIOLÓGICA

El proceso de monitoreo y análisis de información de la Matriz de biota se resume en la Figura 11.



Fuente: WSP (2025)

Figura 11: Diagrama general proceso de monitoreo y análisis de información Matriz Biota.

Los muestreos de Biota del POAL se realizan basándose en la metodología del “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.10500” utilizando el “chorito maico” (*Perumytilus purpuratus*) como especie indicadora de perturbación en áreas costeras por actividad antropogénica, los cuales son recolectados mediante una pala y/o espátula. La recolección se realiza desde el sustrato rocoso intermareal, en las boyas, pilotes o muelles representativos del cuerpo de agua, priorizando la recolección de especies sobre 5 cm de talla.

Las muestras son inmediatamente almacenadas en bolsas herméticas o en envases plásticos, y dispuestos en neveras. Son entregados el mismo día del muestreo a personal de laboratorio.

Al igual que en las otras matrices, se seleccionaron los parámetros considerados relevantes para los fines de este estudio. La lista completa de los parámetros monitoreados por el POAL en el biológica se encuentra en Anexo C. Además, como ya fue mencionado, toda la información histórica de la base de datos POAL estará disponible en la plataforma DATANAM. A continuación, se describen la metodologías y límites de detección para cada análisis de la matriz biota (Tabla 6).

Tabla 6: Parámetros y Metodologías utilizadas en los análisis de matriz biota entre 1997-2023.

Parámetros	Metodologías Biota	LD	Año
Arsénico total	USDA CLG-ARS.04	0,03 mg/Kg	2013 - 2017
	EPA 200.3EPA 6020B	0,004 mg/kg	2018 - 2023
Cadmio Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	0,40 ppm	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,005 mg/kg	2000
	EPA 3050 - Standard Methods	0,1 mg/kg	2005 - 2011
	NCh 2638. Of 2001	0,009 mg/kg	2013 - 2017
	EPA 200.3EPA 6020B	0,001	2018 - 2023
Cobre Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	1,10 ppm	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,1 mg/kg	2000
	EPA 3050 - Standard Methods	0,1 mg/Kg	2007 - 2011
	AOAC Official Methods 985.35	0,1 mg/Kg	2013 - 2017
	EPA 200.3EPA 6020B	0,01 mg/kg	2018 - 2023
Cromo Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	1,65 ppm	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,1 mg/kg	2000
	EPA 3050 - Standard Methods	0,5 mg/kg	2005 - 2011
	EPA 200.3EPA 6020B	0,01 mg/kg	2018 - 2023
Mercurio Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	0,029 ppm	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,001 mg/kg	2000
	EPA 3050 - Standard Methods	0,1 mg/kg	2005 - 2006
	EPA 7471 B Espectroscopia A.A.- Vapor frío.	0,01 mg/Kg	2007 - 2011
	NCh 2667. Of 2001	0,01 mg/Kg	2013 - 2017
	EPA 200.3EPA 6020B	0,04 mg/kg	2018 - 2023
Plomo Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	0,30 ppm	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,100 mg/kg	2000
	EPA 3050 - Standard Methods	0,5 mg/kg	2005 - 2011
	NCh 2751. Of 2003	0,02 mg/Kg	2013 - 2017
	EPA 200.3EPA 6020B	0,004 mg/kg	2018 - 2023

Parámetros	Metodologías Biota	LD	Año
Zinc Total	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 1992	1,6 ppm	1997 - 1999
	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA & WEF, 1998)	0,1 mg/kg	2000
	EPA 3050 - Standard Methods	0,1 mg/kg	2005 - 2011

Fuente: WSP (2025)

4.6 ANÁLISIS DE LA INFORMACION

Los parámetros seleccionados en cada matriz fueron analizados mediante gráficos y tablas para evaluar su evolución temporal y espacial. Para ello se consideraron los valores promedios por año y por estación, junto con su desviación estándar. Cuando los parámetros se encontraron bajo el límite de detección durante un periodo de monitoreo, se utilizó el valor de dicho límite. Cuando en un año se registraron valores tanto por encima como por debajo del límite de detección, se utilizó el criterio de la mitad del límite de detección para calcular el promedio.

Junto con lo anterior, el análisis temporal consideró la distinción de distintos periodos de tiempo según el laboratorio a cargo del análisis. Lo anterior considerando los posibles cambios en el muestreo de parámetros, metodologías y límites de detección. Los periodos son: (1) Varios laboratorios (1993-2001); (2) SGS (2002-2017); y (3) ANAM (2019-2023). En cuanto al análisis espacial, se consideraron 3 sectores dentro de la bahía, Norte, Centro (asociado a la zona del Puerto) y Sur. Esto se detalla en la tabla de estaciones, en la sección 4.1. Cabe señalar que las estaciones al Norte y Sur de la bahía comenzaron a monitorearse el año 2016.

4.6.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Se calcularon las estadísticas descriptivas de cada parámetro evaluado en las tres matrices (agua, sedimento y biota), considerando las diferentes estaciones y periodos de tiempo analizados. Posteriormente, con el objetivo de identificar diferencias estadísticas entre los periodos evaluados por los distintos laboratorios (incluyendo SGS y ANAM) y los diversos sectores monitoreados de la bahía (Norte, Centro y Sur), se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Esta prueba, que no requiere suponer normalidad en los grupos de datos analizados y presenta menor sensibilidad ante valores atípicos, fue utilizada siguiendo las recomendaciones de Siegel & Castellan (1988), bajo la siguiente hipótesis de trabajo:

H_0 : Las medianas en los distintos sectores/periodos son iguales, por lo tanto, no hay diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

H_1 : Al menos una mediana es diferente, por tanto, existen diferencias estadísticamente significativas entre sectores/periodos.

De manera consecutiva y según los parámetros establecidos, se realizó una prueba a posteriori de Dunn (Dunn, 1961) con el objetivo de determinar las diferencias entre los distintos monitoreos. Los softwares utilizados para el exploratorio de datos y los análisis estadísticos

correspondieron a R versión 4.3.2, Past versión 4.03 y Office 365 que contiene Excel y PowerBi. La selección de las herramientas de análisis se basó en su robustez, su aceptación en la comunidad científica y sus elevadas funcionalidades.

Es importante destacar que, en determinadas situaciones, la ausencia de datos en ciertos períodos imposibilitó la realización de análisis estadísticos.

4.7 ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUA (ICA)

En general, el empleo de índices ambientales permite resumir grandes cantidades de datos sobre la calidad del agua, permitiendo en gran medida, comparar la calidad del agua en diversos lugares (Cooper, 1995). Los modelos de índice de calidad ambiental utilizan algoritmos matemáticos para convertir los datos de monitoreo de los indicadores de calidad del agua disponibles en un número único que puede usarse como medida de la calidad del agua. El método es relativamente fácil de aplicar y sus resultados son fáciles de interpretar tanto para profesionales como para no expertos (Abbasi & Abbasi, 2012; Nives, 1999; Sutadian *et al.*, 2018; Uddin *et al.*, 2021).

Los índices de calidad de agua se han estudiado y utilizado en muchos países y bajo distintos modelos matemáticos dependiendo del objetivo y cuerpo de agua. En este aspecto se considera por ejemplo el promedio ponderado, el cual es de fácil aplicación para replicar, además de ser utilizado en distintos cuerpos de agua y por diferentes autores (Brown *et al.*, 1970; Miravet *et al.*, 2009; Gupta *et al.*, 2015); el promedio ponderado modificado, el cual se ha recomendado para agua dulce y ocupado por diferentes autores (Cooper, 1994; IEMA, 2020); índices de calidad marinos y costeros implementados en la Red de Monitoreo de Aguas Marinas (Redcam) (Vivas-aguas *et al.*, 2014). Para el presente estudio se utilizó la metodología de promedio ponderado por ser válida para distintos cuerpos de aguas, tener una fácil interpretación, y poseer un gran potencial de ser replicado.

Como criterio para seleccionar las variables que serán parte del índice de calidad ambiental, se consideró lo evaluado por diferentes estudios (Cooper, 1994; Nguyén *et al.*, 2013), los cuales son:

- Variables de calidad del agua que se miden amplia y regularmente.
- Variables que tienen efectos claros sobre la vida acuática, el uso recreativo o ambos.
- Variables que tienen fuentes artificiales en lugar de fuentes naturales.
- Sensibilidad a cambios razonablemente pequeños en la calidad del agua.
- Rangos realistas de cada variable, desde ninguna contaminación hasta contaminación grave.

En general, se recomienda que las variables de interés sean seleccionadas entre cinco categorías comúnmente reconocidas como: (1) estado y demanda de oxígeno, (2) eutrofización, (3) aspectos de salud, (4) características físicas y (5) sustancias disueltas (Samboni *et al.*, 2007).

A partir de lo anterior, para el desarrollo del índice de calidad ambiental se utilizó la siguiente metodología:

- a. Selección del conjunto de variables de interés.
- b. Desarrollo de curvas de calibración para comparar variables en una escala común.
- c. Ponderar las variables en función de su importancia relativa (pesos).
- d. Formular y calcular el índice de calidad ambiental.

A continuación, se describe la forma de obtener el índice de calidad ambiental considerando los pasos mencionados anteriormente y tomando en cuenta los antecedentes del presente proyecto.

a) Selección del conjunto de variables de interés

En relación de las variables de interés con las categorías recomendadas, se seleccionaron las variables indicadas en la Tabla 7. La selección consideró la relevancia de cada variable y la disponibilidad de todas ellas en un periodo determinado.

Tabla 7: Categorías de variables ambientales en cursos de agua.

Categorías	Variable seleccionada
Estado y demanda de oxígeno	Oxígeno disuelto
Eutrofificación	Nitrato, fosfato
Aspecto de salud	Coliformes fecales
Características físicas	Solidos suspendidos totales

Fuente: WSP (2025). Modificado de Dunnette (1979)

b) Curvas de calibración y escalas de valoración de variables

Las curvas de calibración para cada variable fueron extraídas del estudio de Calderón (2019) y se presentan en la Tabla 8. Estas se desarrollan con el fin de que los subíndices transformen los valores de los parámetros fisicoquímicos con sus diferentes unidades de medida en valores no dimensionales, las cuales se traducen en escalas comparables de 0 a 100% de calidad (0% de calidad corresponde a una mala condición del agua y el 100% en la mejor calidad posible) (Calderón, 2019). En la Tabla 9 se definen las escalas de valoración de cada variable dependiendo de la concentración en el medio.

Tabla 8: Ecuaciones de función de las curvas para determinar el subíndice del ICA.

Variable	Ecuación
Oxígeno disuelto	$y = -0,14x^3 + 1,81x^2 + 5,68x + 1,92$
Nitrato	$y = 2E - 11x^3 - 5E - 7x^2 - 5,3E3x + 102$
Fosfato	$y = -8E - 4x^2 - 0,94x + 97,2$
Coliformes fecales	$y = 1E - 12x^4 - 1E - 8x^3 + 4E - 5x^2$

Variable	Ecuación
	$-7,33E - 2x + 97,8$
Solidos suspendidos totales	$y = 1,4E - 3x^2 - 0,86x + 97,5$

Fuente: WSP modificado de Cooper, 1994; Vivas Aguas *et al.*, 2014; Nguyen & Sevando, 2018.

Tabla 9: Categorías y escala de valoración para las variables seleccionadas para el ICA.

Concentración					Categorización	Índice
Oxígeno Disuelto (mg/L)	Nitrato (ug-N/L)	Fosfato (ug/L)	Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)		
0-2	12000-10000	3000-2000	3000-2000	130-120	Red	0-25
2-5	10000-6000	2000-1000	2000-1000	120-60	Yellow	25-50
5-6	6000-4000	1000-500	1000-500	60-30	Yellow	50-70
6-7	4000-3000	500-70	500-70	30-8	Green	70-90
7-10	3000-0	70-0	70-0	8-0	Blue	90-100

Fuente: WSP modificado de Cooper, 1994; Vivas Aguas *et al.*, 2014; Nguyen & Sevando, 2018.

c) Ponderar las variables en función de su importancia relativa (pesos)

La determinación de los pesos de cada parámetro se basa en la importancia relativa de estos para la calidad del agua, lo cual permite identificar qué parámetros tienen un impacto más significativo, asignándoles un mayor peso cuando afectan considerablemente la calidad del agua, y lo contrario cuando su efecto es menor. Esta asignación de pesos se realizó a través de una revisión bibliográfica que proporciona información sobre la contribución de cada indicador a la calidad general del agua (Cooper, 1994; Aguas-Vivas *et al.*, 2014; IEMA, 2020; Nguyen & Sevando, 2019). A continuación, se presentan los pesos asignados a los parámetros seleccionados.

Tabla 10: Asignación del valor de importancia o el peso de cada variable dentro del índice.

Parámetro	Peso relativo
Fosfato	0,2
Nitrato	0,15
SST	0,2
DO	0,25
CF	0,2

Fuente: WSP 2025, en base a Cooper, 1994; Vivas Aguas *et al.*, 2014; Nguyen & Sevando, 2018.

d) Formular y calcular el índice de calidad ambiental

En base a las ecuaciones que se derivan de las curvas de calibración (Tabla 8) y de los pesos relativos (Tabla 10), se obtuvo el índice de calidad ambiental (ICA) de acuerdo con la siguiente

formulación derivada del promedio ponderado aritmético, donde q corresponde a la concentración del subíndice del parámetro y w al peso relativo de cada parámetro.

$$ICA = \sum_{i=1}^n q_i w_i$$

4.8 ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL PARA SEDIMENTO

En relación a metales pesados, es importante destacar que, en teoría, los metales pesados presentes en el agua tienden a ser absorbidos por partículas en suspensión dentro de la columna de agua, las cuales posteriormente se depositan y hacen que el contenido de metales pesado en agua sea menor que el de sedimentos. Por consiguiente, las concentraciones de metales pesados presentes en el agua costera pueden no ser un indicador fiable del grado de contaminación por dichos elementos. Por esta razón, la evaluación de este tipo de contaminación debe realizarse a través del análisis de la acumulación de metales pesados en plancton, organismos bentónicos o sedimentos (Nguyen *et al.*, 2013). Bajo esta premisa, los niveles de metales pesados serán determinados principalmente a partir del análisis de los sedimentos.

Los contaminantes tóxicos de metales pesados en el ecosistema acuático se introducen principalmente a través de diversas fuentes naturales y antropogénicas. En este contexto, las fuentes de aportes naturales pueden considerarse procesos de meteorización (rocas y suelos), la deposición atmosférica de partículas y los sedimentos eólicos, mientras que fuentes antropogénicas pueden relacionarse a vertimiento de aguas residuales, actividades mineras, entre otras, las cuales tienen un alto impacto en la acumulación de contaminantes de metales pesados en el medio marino específicamente en los sedimentos, ello debido a que solo una pequeña cantidad de metales pesados permanece en la columna de agua y la mayor cantidad acumulada en los sedimentos, los cuales actúan como sumideros (Perumal *et al.*, 2021; Ahamad *et al.*, 2020).

En concreto, para evaluar la calidad de los sedimentos se han considerado dos indicadores como el factor de contaminación (CF) e índice de geoacumulación (I_{geo}). Estos indicadores se basan en estudios que evalúan la calidad de sedimentos marinos (Hakanson L., 1979; Naik *et al.*, 2023; Ahamad *et al.*, 2020; Perumal *et al.*, 2021). A continuación, se describe cada uno de estos indicadores:

Factor de contaminación (CF): Dicho índice calcula el contenido del metal en relación con una muestra no expuesta a contaminación antropogénica.

$$CF = \frac{C_{metal}}{C_{background}}$$

Donde C_{metal} corresponde a la concentración en la muestra y $C_{background}$ a la concentración del metal de una muestra no contaminada (Hakanson L., 1979; Naik *et al.*, 2023; Ahamad *et al.*, 2020; Perumal *et al.*, 2021). La categorización del factor de contaminación se observa en la Tabla 11. Es relevante señalar que la Bahía de Antofagasta no posee una norma de calidad secundaria para metales, por lo tanto, las categorías no indican necesariamente una contaminación como tal, sino que comprende una referencia en relación al índice utilizado.

Tabla 11: Rango categórico del Índice de metales en Sedimento.

Rango	Categoría
$CF < 1$	Baja contaminación
$1 < CF < 3$	Contaminación moderada
$3 < CF < 6$	Contaminación considerable
$CF > 6$	Alta contaminación

Fuente: Hakanson L., 1979; Naik *et al.*, 2023; Ahamad *et al.*, 2020; Perumal *et al.*, 2021.

Índice de Geoacumulación: Es la estimación del probable enriquecimiento de los metales en los sedimentos (Naik *et al.*, 2023; Ahamad *et al.*, 2020; Perumal *et al.*, 2021).

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5 * B_n}$$

Donde B_n es el valor background del metal, mientras que C_n es la concentración de metal n en los sedimentos (turekiano & Wedepohl, 1961). Se utiliza el factor 1,5 para tener en cuenta cualquier variación en los datos de fondo debido a variaciones litológicas.

En relación a los background, se considera lo expuesto por Valdés *et al.*, 2009, considerando que son propios del sector. Estos se presentan a continuación (Tabla 12).

Tabla 12: Background's de metales en la Bahía de Antofagasta.

Metal	Background [mg/Kg]
Cobre	53,5
Plomo	4,7
Cadmio	20,5
Zinc	13,1

Fuente: WSP 2025, en base a valores de Valdés *et al.*, 2009.

La categorización del factor de contaminación es la siguiente (Tabla 13):

Tabla 13: Rango categórico del Índice de Geoacumulación en Sedimento.

Rango	Categoría
$I_{geo} < 0$	No hay acumulación
$0 < I_{geo} < 2.5$	Acumulación Moderada
$2.5 < I_{geo} < 5$	Fuertemente Acumulado
$5 < I_{geo}$	Extremadamente Acumulado

Fuente: Naik *et al.*, 2023; Ahamad *et al.*, 2020; Perumal *et al.*, 2021.

5 RESULTADOS

Interpretación de resultados para las distintas matrices analizadas

Los resultados que se exponen en el presente informe están asociados a los registros del POAL para la matriz agua, sedimento y biota, y se desarrollan a continuación según el siguiente orden. Los resultados se presentan bajo la perspectiva de un análisis cuantitativo, incluyendo representaciones gráficas que ilustran la distribución espacial de las estaciones de monitoreo y el rango de concentración de cada estación utilizando toda la data histórica. Así mismo, de manera gráfica también se muestra la evolución anual histórica agregada anual (toda la data) por cada año, para finalizar con una representación que permite analizar la evolución anual histórica desagregada por cada año y por cada estación de monitoreo. El análisis de cada parámetro y para cada matriz de estudio, cierra con análisis estadístico, destinado a para diferencias estadísticas en las concentraciones entre distintos periodos y distintos sectores de la bahía previamente definidos (Norte, Centro y Sur).

En lo específico, para el caso de las representaciones gráficas de cada parámetro analizado, estas se han desarrollado con un enfoque que va de lo particular a lo general.

a) Evolución anual histórica desagregada por estación: Esta representación gráfica, muestra la **evolución** histórica por estación de monitoreo respecto de su concentración promedio anual histórica en cada parámetro analizado. La representación se realiza mediante un gráfico matricial de doble entrada, en donde las filas corresponden a las estaciones de monitoreo y las columnas corresponden al año de medición. A partir de ello, cada celda al interior de la matriz, que corresponde a la intersección de una fila y una columna, representa la concentración promedio que combina la estación de monitoreo y el año. Esta estructura de la representación de la gráfica matricial muestra tendencias a lo largo del tiempo, compara datos entre diferentes estaciones, y permite visualizar patrones en los datos a partir de sus valores, lo cual es complementado con un gradiente de colores que representa el valor de la concentración promedio. Blanco; bajo el límite de referencia, Amarillo; dentro del límite de referencia, y Gradiente amarillo-rojo valores entre la referencia mínima a máxima, Rojo; sobre los valores de referencia.

b) Evolución anual histórica agregada: La segunda figura de cada análisis, muestra una **distribución temporal** mediante grafica de columnas y barras de error, de la concentración anual promedio considerando todas las estaciones dispuestas en la bahía y que cuentan con información para el análisis. Además, en la gráfica se pueden identificar los diferentes periodos en que un determinado laboratorio ha realizado el análisis de las muestras. En la gráfica también se incluye un triángulo invertido que indica el límite de detección de la técnica analítica utilizada. Esta figura facilita la observación de tendencias generales y variaciones temporales en relación con el valor promedio de la concentración que la bahía presenta para cada año analizado.

c) Distribución espacial de la concentración: La primera figura muestra la **distribución espacial** mediante un mapa temático de la disposición de las estaciones de monitoreo en la bahía de Antofagasta. Esta figura incluye una gráfica de tipo burbujas que representa el rango promedio de concentración del parámetro analizado. Esta representación ofrece una visión

general comprensible de la concentración del parámetro en la bahía, incluyendo una representación específica en las tres zonas de la bahía previamente definidas para el análisis.

5.1 MATRIZ AGUA DE MAR

A continuación, se presenta el análisis de los parámetros de la matriz de agua de mar. A raíz de que la bahía no cuenta con una Norma Secundaria en materia de calidad de agua, los resultados de los distintos parámetros fueron comparados con la Guía Australiana y Neozelandesa para la calidad de aguas marinas para la protección de un 95% de especies, Tabla 3.4.1 del ANZECC/ARMCANZ, 2000. Para aquellos parámetros que no están contenidos en dicha guía, se consideró a modo de referencia, la “National Recommended Water Quality Criteria” de la EPA, 2009 (CC Crónico) y La Norma de Calidad del Perú (D.S. N° 004-2017-MINAM, Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático) (Tabla 14).

Cabe destacar que los análisis presentados para la matriz acuosa corresponden al promedio de los datos a distintos estratos de la columna de agua. Esto aplica para todos los períodos de tiempo analizados.

Tabla 14: Recomendaciones de Calidad de agua marina de normativa internacional.

Parámetro	Límite	Unidad	Norma
Aceites y grasas	5	mg/L	D.S. N° 004-2017-MINAM
Amonio	910	µg/L	ANZECC/ARMCANZ 2000 95%
Arsénico Disuelto	36	µg/L	EPA 2009 (crónico)
Cobre Disuelto	1,3	µg/L	ANZECC/ARMCANZ 2000 95%
Coliformes fecales	2000	NMP 100 mL ⁻¹	D.S. N° 004-2017-MINAM
Cromo disuelto	27,4	µg/L	ANZECC/ARMCANZ 2000 95%
Nitrato	200	mg/L	D.S. N° 004-2017-MINAM
Oxígeno disuelto	≥4	mg/L	D.S. N° 004-2017-MINAM
Sólidos suspendidos	30	mg/L	D.S. N° 004-2017-MINAM
Zinc Disuelto	15	µg/L	ANZECC/ARMCANZ 2000 95%

Fuente: WSP (2025) en base a normas de referencia internacionales.

5.1.1 ACEITES Y GRASAS

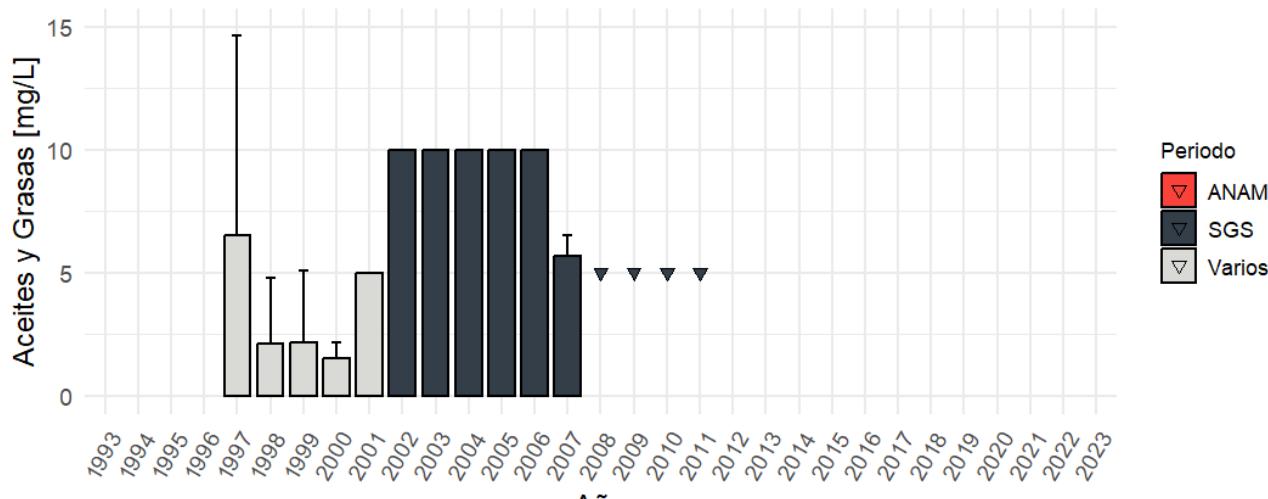
La Figura 12 y Figura 13 muestran las concentraciones de aceites y grasas en mg/L desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existen periodos sin información entre el año 1993 y 1996, y entre el año 2012 al 2023. Durante el periodo en el cual si se registró el parámetro las concentraciones históricas se encuentran entre 0,1 y 18,4 mg/L, obteniendo la mayor concentración en la estación 100, ubicada en la zona del puerto, durante el año 1997.

Los registros en los primeros años de medición (1998-2001), mostraron valores promedios que son inferiores a 6 mg/L. Del 2002 al 2011, se generó un cambio de laboratorio y sus resultados muestran un periodo sin variación (10 mg/L) entre el 2002 y 2006, para luego disminuir el año 2007. Para el último periodo de medición registrado, (2008-2011) todos los valores están por debajo del límite de detección. Al comparar con la norma de referencia, se observa una superación del límite establecido por el D.S. N° 004-2017-MINAM de 5 mg/L, en 1997 y 2007. Se desconoce si hubo superación del límite de referencia entre los años 2002 y 2006, ya que el L.D. fue mayor o igual al límite establecido.

Estación	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	PROM	MIN	MAX	DESV
030	1,1	3,1	3,4	1,6	5,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	5,0	2,5	2,5	2,5	2,5	4,7	0,3	10,0	3,3
100	11,9	1,1	1,0	1,6	5,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	6,0	2,5	2,5	2,5	2,5	5,1	0,1	18,4	4,0
120					5,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	6,0	2,5	2,5	2,5	2,5	5,4	2,5	10,0	3,3
PROM	6,5	2,1	2,2	1,6	5,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	5,7	2,5	2,5	2,5	2,5	5,1	0,1	18,4	3,6

Fuente: WSP (2025)

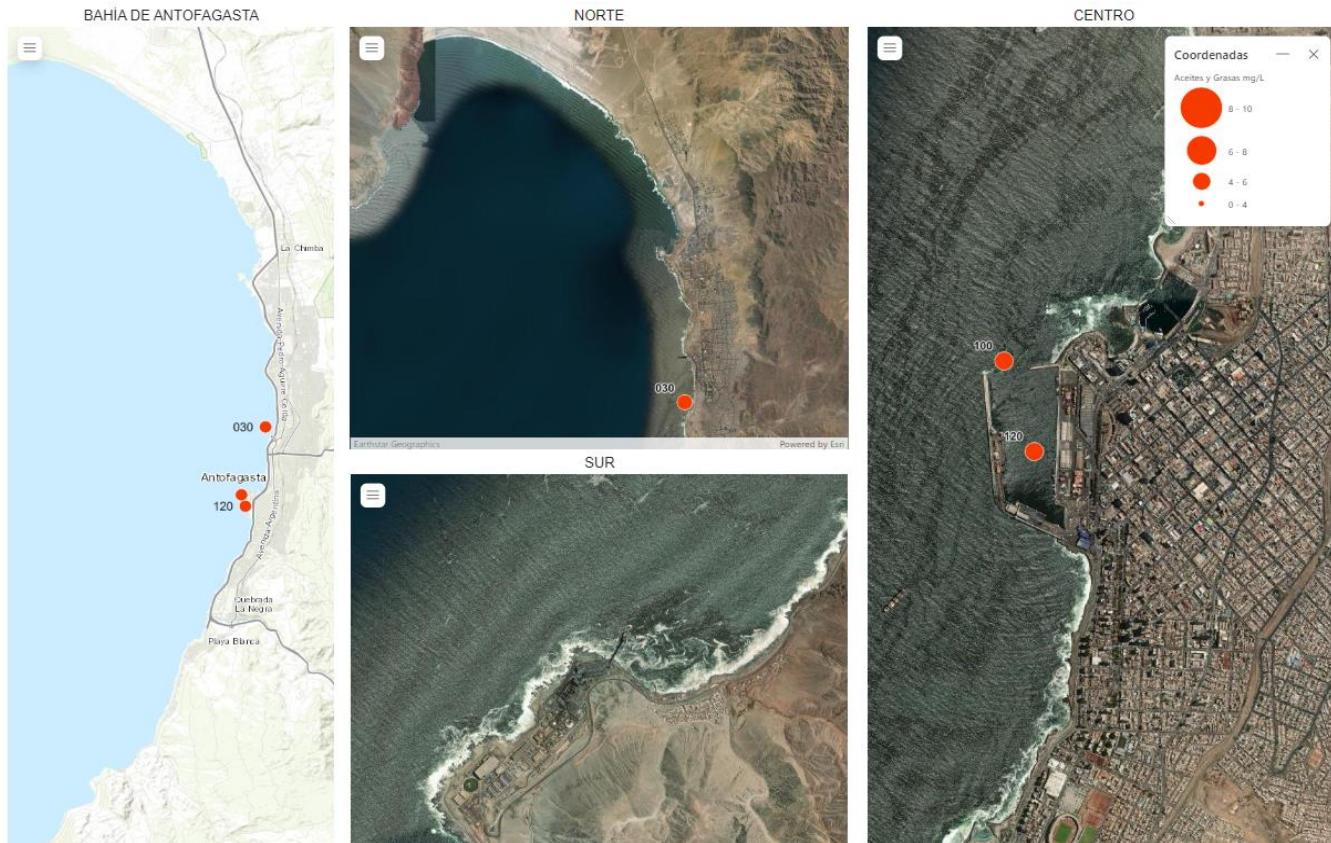
Figura 12: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo del Aceites y Grasas (mg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 13: Promedio de la concentración anual histórica de Aceites y Grasas en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se presenta un mapa temático de la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada de Aceite y grasas, en las tres zonas definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 14: Promedio de la concentración histórica de Aceites y Grasas por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis estadísticos

Debido a que este parámetro no presenta datos desde el año 2011, no fue posible realizar análisis estadísticos entre sectores. Al realizar la prueba no paramétrica entre períodos de tiempo, se observaron diferencias significativas (Kruskal Wallis, $H=14,34$ gl=1 $p<0,05$) entre el periodo 1997-2001 (analizado por distintos laboratorios) y el periodo 2002-2011 (analizado por SGS) (Tabla 15).

Tabla 15: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Aceites y grasas en la matriz de agua de mar. s/d=sin dato.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	<0,05	-
2019-2023	s/d	s/d

Fuente: WSP (2025)

5.1.2 AMONIO

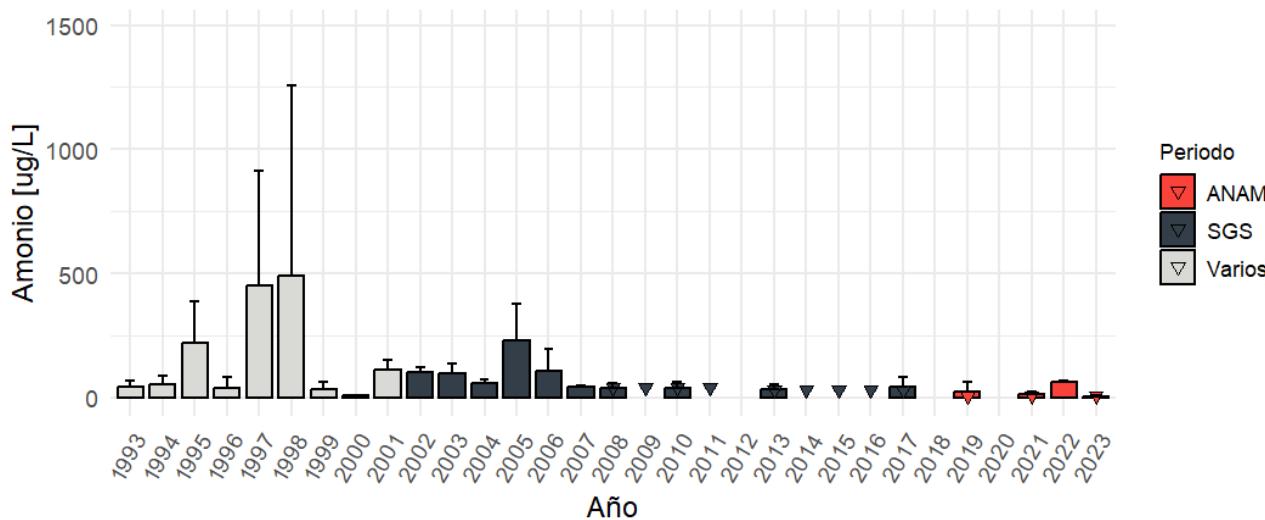
La Figura 15 y Figura 16 muestran las concentraciones de amonio en $\mu\text{g/L}$ desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de amonio varían entre 4,0 y 1.640,0 $\mu\text{g/L}$, observándose la mayor concentración en la estación 030, ubicada en el sector centro, al norte del puerto, durante el año 1998. Los registros en los primeros años de medición (1993-2001), mostraron los mayores valores promedios, observándose una disminución en el tiempo en los siguientes períodos, encontrándose gran parte de la información bajo el límite de detección de laboratorio.

En tres ocasiones se sobrepasó el valor que propone la norma ANZECC/ARMCANZ (910 $\mu\text{g/L}$), en las estaciones 130 en el año 1995 y la estación 030 en los años 1997 y 1998 los cuales se pueden observar en rojo en la columna de Máximos de la Figura 15.

Estación	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	PROM	MIN	MAX	DESV	
028																																				
029																																				
030	40,0	68,3	221,5	70,7	645,0	868,0	37,0	10,0	135,0	100,0	115,0	50,0	215,0	165,0	47,5	42,5	20,0	47,5	20,0	40,0	15,0	15,0	15,0	52,5	5,0	5,0	69,0	5,0	22,4	5,0	90,0	26,3				
060	40,0	83,7	261,0	43,0																											18,5	5,0	59,0	23,4		
090	80,0	88,7	119,0	32,0																											109,2	5,0	1.640,0	251,4		
100	13,0	18,7	99,5	20,3	258,0	111,5	29,5	10,0	91,5	85,0	115,0	65,0	225,0	80,0	40,0	32,5	20,0	35,0	20,0	15,0	15,0	15,0	15,0	47,5					104,7	38,0	300,0	87,5				
105																																	75,6	15,0	180,0	52,6
110																																	58,3	4,0	396,0	73,3
115																																	71,6	15,0	65,0	5,0
120	50,0	27,7	101,0	24,7																											45,6	5,0	138,1	51,3		
130	13,0	17,7	563,5	107,0																											45,2	5,0	74,0	5,0		
160	60,0	77,0	190,5	37,0																											52,7	30,0	64,0	5,0		
220																																40,9	5,0	100,3	36,8	
225																																52,7	5,0	380,0	58,4	
230																																168,2	10,0	1.002,0	308,0	
PROM	42,3	54,5	222,3	47,8	451,5	489,8	33,3	10,0	114,0	103,3	100,0	58,3	228,3	108,3	42,5	36,7	20,0	40,0	20,0	35,0	15,0	15,0	15,0	45,0	23,1	12,2	64,1	6,3	71,2	4,0	1.640,0	150,5				

Fuente: WSP (2025)

Figura 15: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Amonio ($\mu\text{g/L}$) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 16: Promedio de la concentración anual histórica de Amonio en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se muestra un mapa temático que ilustra la distribución espacial y la ubicación de las estaciones de monitoreo, acompañado de una gráfica de burbujas que indica el rango de concentración histórica agregada de **amonio** en las tres zonas definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 17: Promedio de la concentración histórica de Amonio por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=2,63$, $gl=2$, $p=0,27$). Por otro lado, si se observaron diferencias significativas en los períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=33,6$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba *a posteriori* se observó que el período 2019-2023, analizado por ANAM, se diferenció estadísticamente tanto del período 1993-2001 (varios laboratorios), como del período 2002-2017 (analizado por SGS) (Tabla 16).

Tabla 16: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para el Amonio en la matriz de agua de mar.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	0,37	-
2019-2023	<0,05	<0,05

Fuente: WSP (2025)

5.1.3 ARSÉNICO DISUELTO

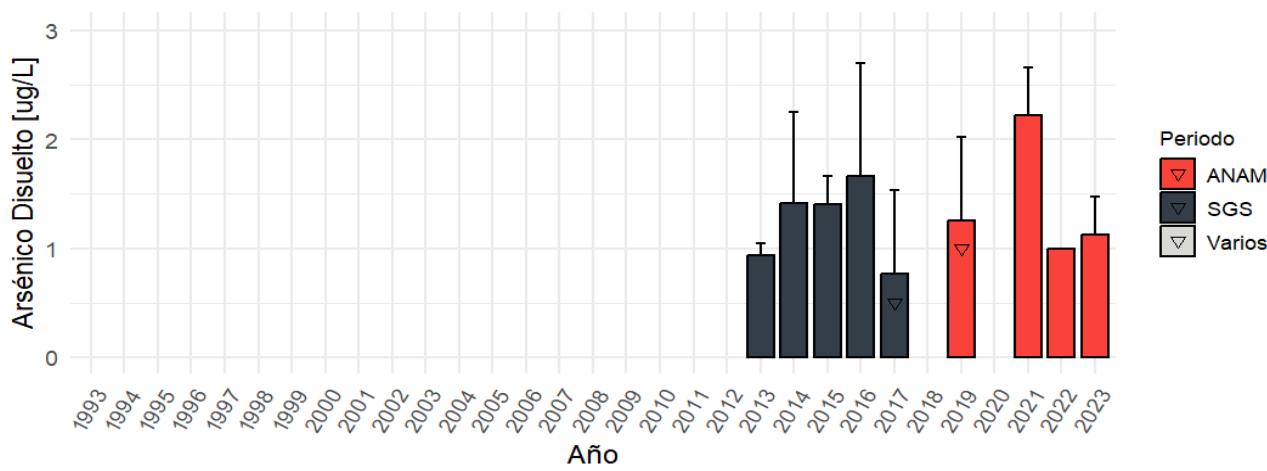
La Figura 18 y Figura 19 muestran las concentraciones de arsénico disuelto en $\mu\text{g/L}$ desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existe un periodo sin información entre el año 1993 y el año 2012. Las concentraciones históricas de arsénico disuelto varían entre <0,5 (L.D.) y 3,80 $\mu\text{g/L}$. La mayor concentración se observó en la estación 100, ubicada en el sector centro, en la zona del puerto, durante el año 2016.

La Norma ANZECC/ARMCANZ no tiene referencia para el Arsénico disuelto. La referencia de la EPA para la calidad de las aguas marinas es de 36 $\mu\text{g/L}$, y los resultados muestran que todas las estaciones presentan concentraciones por debajo de este umbral.

Estación	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV
028							4,5	4,8	0,5	1,3	0,0	1,0	1,0	1,0	1,9	0,0	6,6	2,0
029											0,0	1,0	1,0		0,5	0,0	1,0	0,5
030	0,3	0,5	2,3	1,7	2,4	3,0	4,5	5,9	1,8	1,3	0,0	1,0	1,0	1,0	1,8	0,0	8,7	2,0
100	0,3	0,5	0,7	1,5	2,1	9,0	4,0	10,9	3,8	1,8					2,4	0,1	12,7	3,1
105											0,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5
110											0,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5
115											0,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5
120	0,4	0,5	0,8	1,8	2,9	3,0	3,5	11,2	3,0	2,5	0,0	1,0	1,0	1,0	2,1	0,0	16,4	3,0
220									0,5	0,8					0,7	0,5	1,0	0,2
225											0,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5
230											0,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5
PROM	0,4	0,5	1,3	1,7	2,5	5,0	4,1	8,2	2,1	1,5	0,0	1,0	1,0	1,0	1,7	0,0	16,4	2,4

Fuente: WSP (2025)

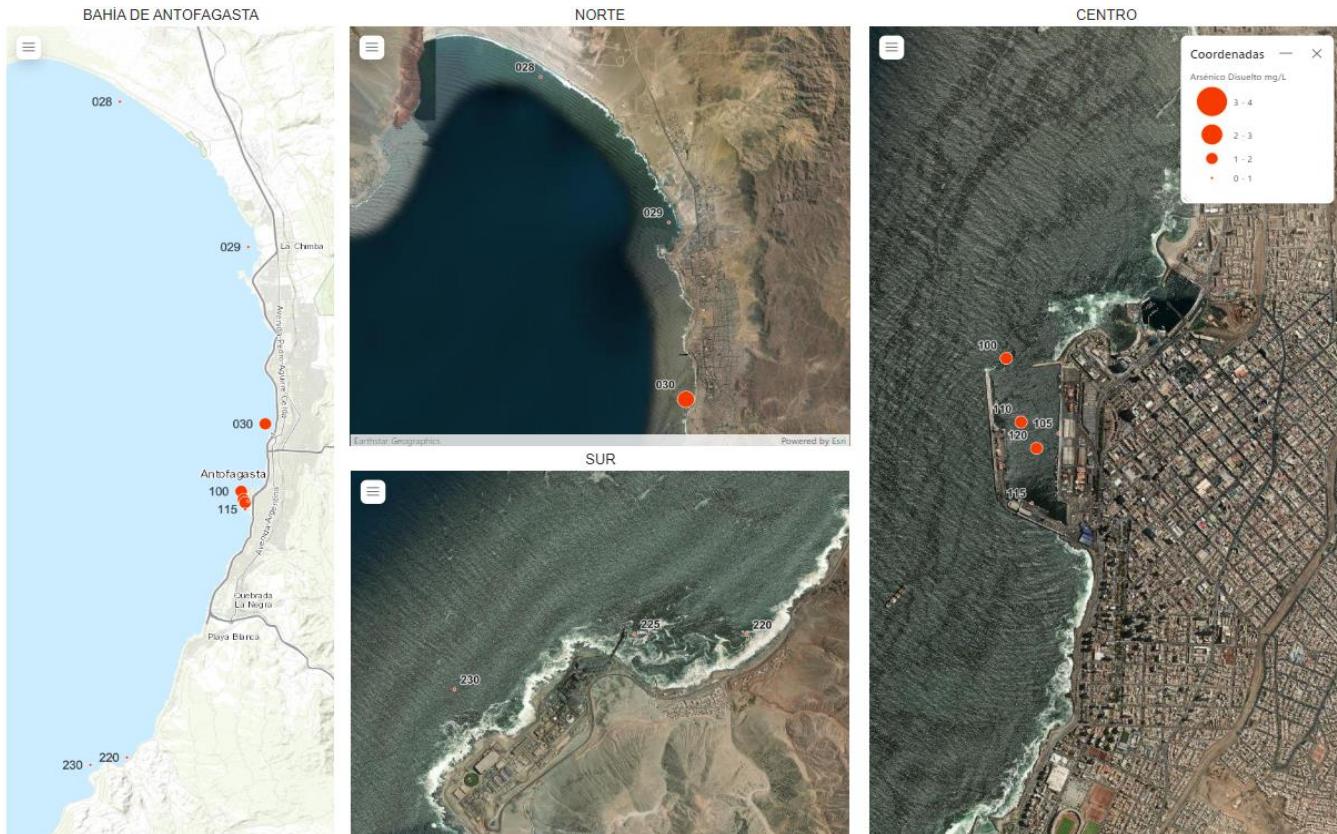
Figura 18: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Arsénico Disuelto ($\mu\text{g/L}$) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 19: Promedio de la concentración anual histórica de Arsénico disuelto en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se presenta un mapa temático de la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Arsénico Disuelto**, subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 20: Promedio de la concentración histórica de Arsénico Disuelto por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=1,37$ gl=2, $p=0,50$). De igual forma, no se observaron diferencias entre los periodos analizados (Kruskal Wallis, $H=1,05$ gl=1, $p=0,31$).

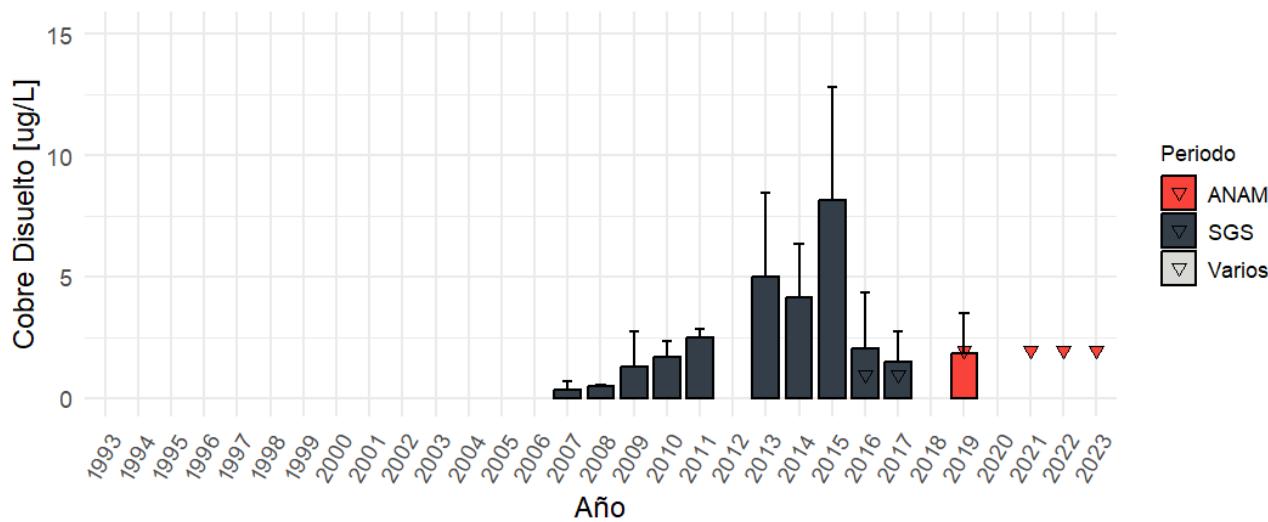
5.1.4 COBRE DISUELTO

La Figura 21 y Figura 22 muestran las concentraciones de cobre disuelto en $\mu\text{g/L}$ desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existe un periodo sin información entre el año 1993 y el año 2006. Las concentraciones históricas de cobre disuelto varían entre $<1 \mu\text{g/L}$ (L.D.), y $16,4 \mu\text{g/L}$. La mayor concentración se observa en la estación 120, ubicada en el sector centro, en la zona del puerto, durante el año 2015. Se observa una superación del valor referencial que presenta la norma ANZECC/ARMCANZ ($1,3 \mu\text{g/L}$) entre los años 2009 y 2017 en las estaciones 028, 030, 100 y 120.

Estación	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV
028							4,5	4,8	0,5	1,3	0,0	1,0	1,0	1,0	1,9	0,0	6,6	2,0
029											0,0	1,0	1,0		0,5	0,0	1,0	0,5
030	0,3	0,5	2,3	1,7	2,4	3,0	4,5	5,9	1,8	1,3	0,0	1,0	1,0	1,0	1,8	0,0	8,7	2,0
100	0,3	0,5	0,7	1,5	2,1	9,0	4,0	10,9	3,8	1,8					2,4	0,1	12,7	3,1
105											0,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5
110											0,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5
115											0,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5
120	0,4	0,5	0,8	1,8	2,9	3,0	3,5	11,2	3,0	2,5	0,0	1,0	1,0	1,0	2,1	0,0	16,4	3,0
220									0,5	0,8					0,7	0,5	1,0	0,2
225											0,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5
230											0,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5
PROM	0,4	0,5	1,3	1,7	2,5	5,0	4,1	8,2	2,1	1,5	0,0	1,0	1,0	1,0	1,7	0,0	16,4	2,4

Fuente: WSP (2025)

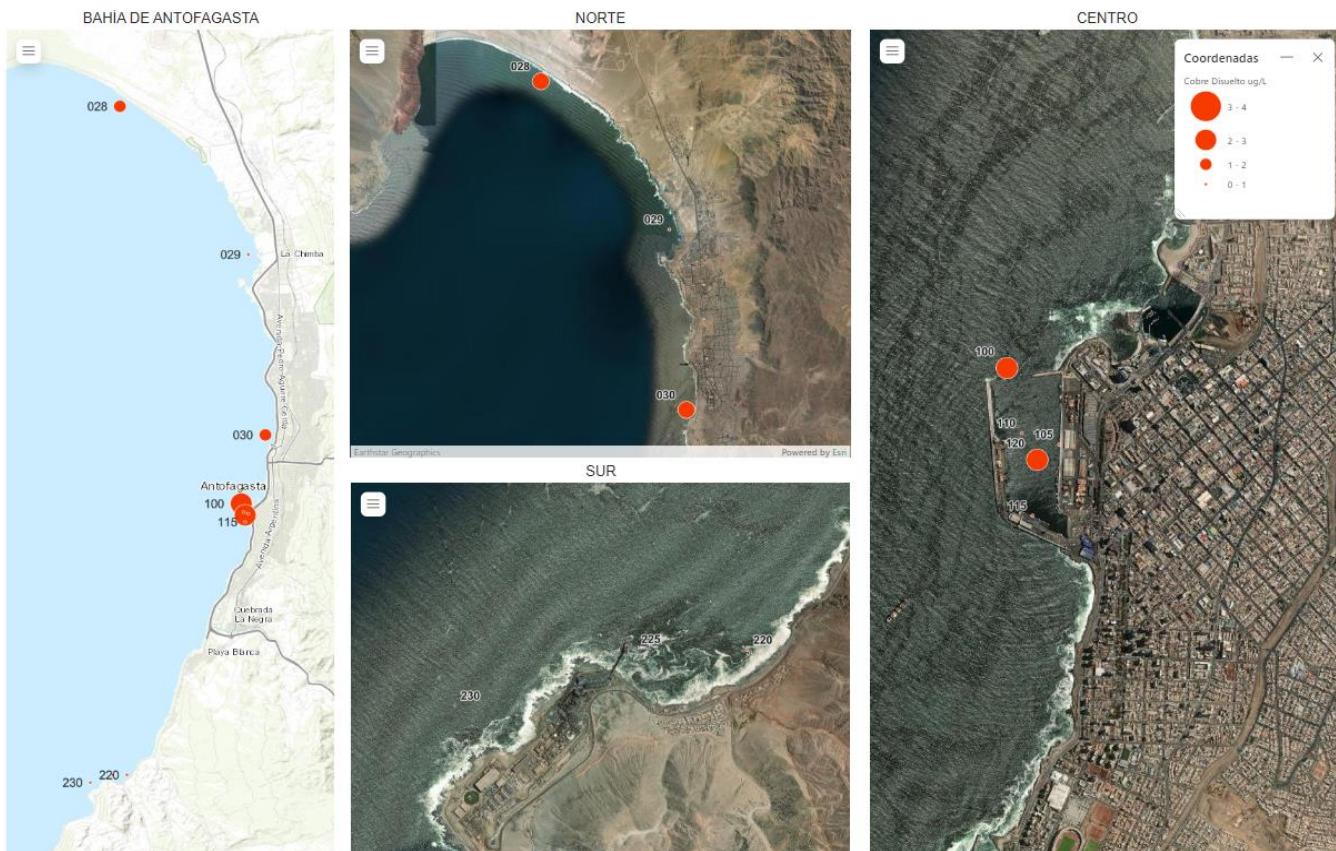
Figura 21: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cobre Disuelto ($\mu\text{g/L}$) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 22: Promedio de la concentración anual histórica de Cobre disuelto en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Cobre disuelto**, subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 23: Promedio de la concentración histórica de Cobre Disuelto por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=3,28$ $gl=2$, $p=0,19$). De igual forma, no se observaron diferencias entre los períodos analizados (Kruskal Wallis, $H=1,20$ $gl=1$, $p=0,27$).

5.1.5 COLIFORMES FÉCALES

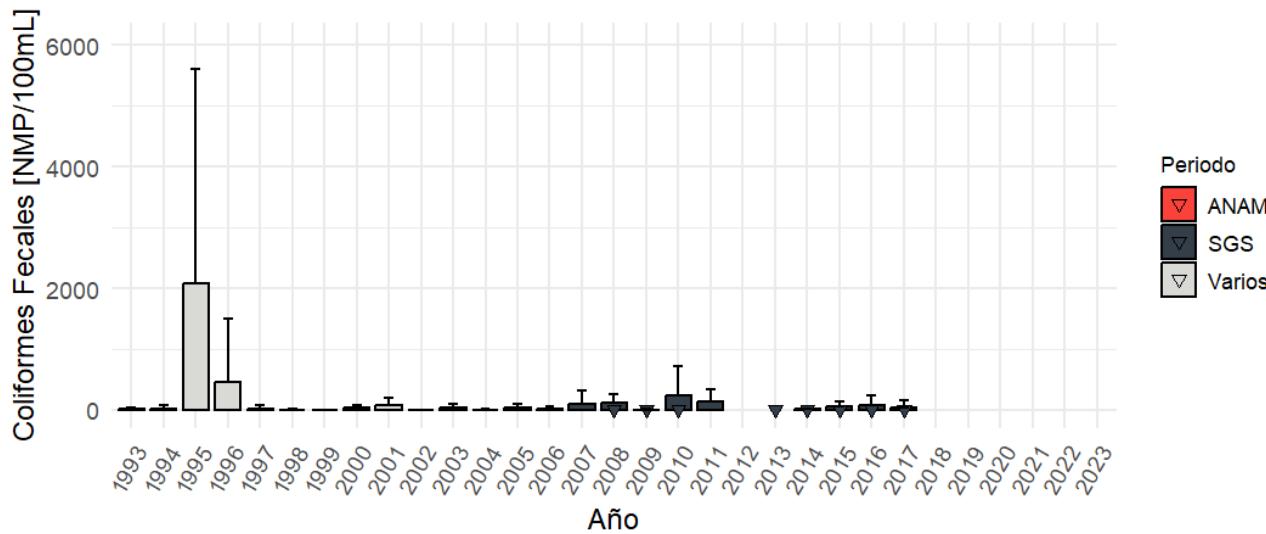
La Figura 24 y Figura 25 muestran las concentraciones de coliformes fecales en NMP/100 ml desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existe un periodo sin información entre el año 2019 y el año 2023. La concentración histórica de coliformes fecales varía entre <1,8 (L.D.) y 16.000 NMP/100ml, observándose la mayor concentración en la estación 130, en el sector del puerto, en el año 1995.

Cabe señalar que se supera el límite establecido en el D.S. N° 004-2017-MINAM para aguas marinas de 2.000 NMP/100ml, durante los años 1995 y 1996, y en las estaciones 030, 060 y 130.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	PROM	MIN	MAX	DESV		
028																										0,9	0,9	0,9	0,0	
030	68,0	9,5	111,0	807,3	47,4	1,8	1,8	56,0	2,0	3,0	86,0	10,5	2,0	57,0	16,5	176,1	11,5	689,2	234,0	0,9	12,0	185,0	178,4	183,5	153,5	0,9	2.400,0	399,9		
060	4,0	8,9	6.350,0	1.168,0																						1.803,9	2,0	9.200,0	2.978,7	
090	2,0	3,9	7,5	4,4																							4,7	2,0	13,0	4,0
100	2,0	2,0	4,9	7,0	2,4	6,4	1,8	2,0	23,0	2,0	3,0	2,0	6,5	1,9	280,5	135,5	2,9	2,6	28,0	0,9	23,5	8,8	175,5	2,5	40,7	0,9	920,0	134,7		
120	2,0	2,0	8,0	5,8					183,5	2,0	2,0	2,0	89,0	1,9	12,7	21,7	0,9	1,5	176,0	0,9	4,4	19,3	0,9	25,5	31,1	0,9	540,0	90,7		
130	2,0	102,3	8.016,5	1.171,0																						2.206,1	2,0	16.000,0	4.994,5	
160	4,5	2,0	25,5	5,2																							8,6	2,0	49,0	14,5
220																										0,9	0,9	0,9	0,0	
PROM	12,1	18,7	2.074,8	452,7	24,9	4,1	1,8	29,0	69,5	2,3	30,3	4,8	32,5	20,3	103,2	111,1	5,1	231,1	146,0	0,9	10,2	53,5	79,1	42,7	230,2	0,9	16.000,0	1.332,9		

Fuente: WSP (2025)

Figura 24: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Coliformes Fecales (NMP/100ml) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.

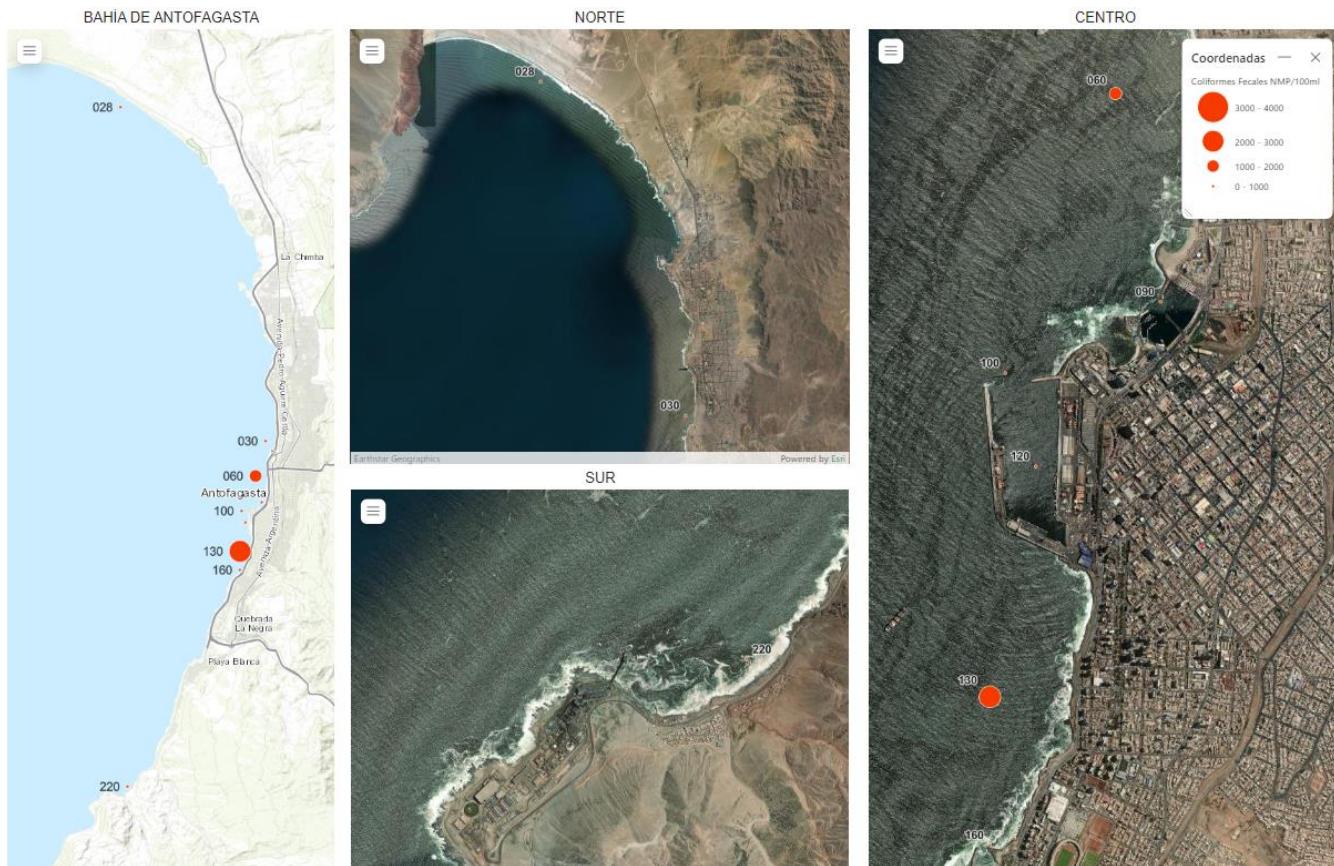


Fuente: WSP (2025)

Figura 25: Promedio de la concentración anual histórica de Coliformes fecales en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración

histórica agregada del parámetro **Coliformes Fecales**, subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 26: Promedio de la concentración histórica de Coliformes Fecales por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=5,51$ $gl=2$, $p=0,06$). De igual forma, no se observaron diferencias entre los períodos analizados (Kruskal Wallis, $H=3,77$, $gl=1$, $p=0,05$).

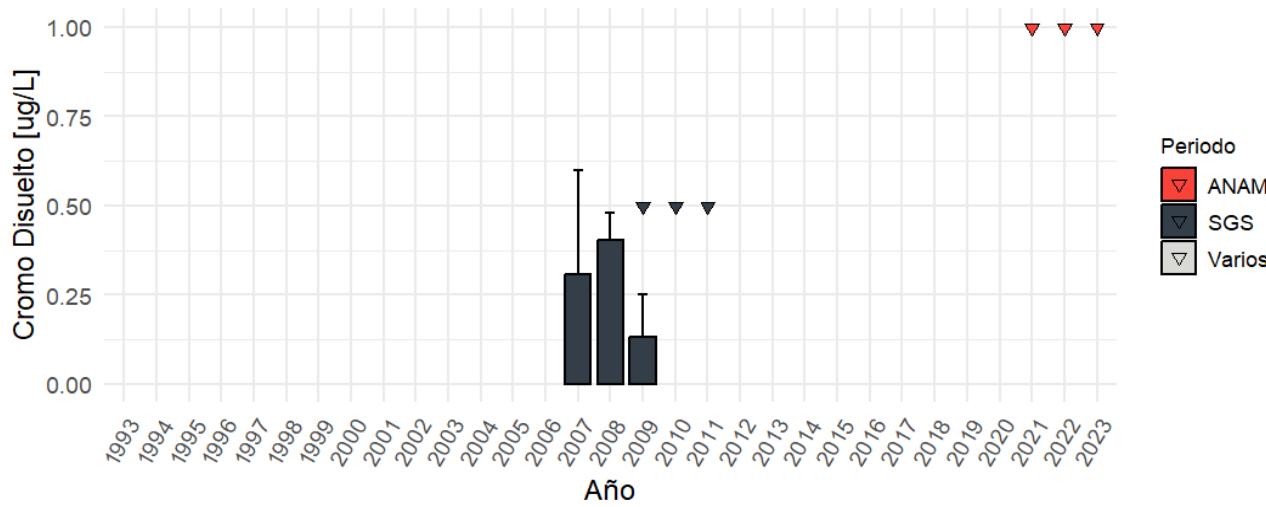
5.1.6 CROMO DISUELTO

La Figura 27 y Figura 28 muestran las concentraciones de cromo disuelto en $\mu\text{g/L}$ desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existen periodos sin información entre el año 1993 y el año 2006, así como también desde el año 2012 al 2019. Durante el periodo en el cual, si se registró el parámetro, el cromo disuelto mostró concentraciones que variaron entre 0,05 y 0,7 $\mu\text{g/L}$. La mayor concentración se observó en la estación 100, ubicada en el sector centro, en la zona del puerto, durante el año 2007. En el último periodo (2021-2023), los valores siempre estuvieron bajo el límite de detección del laboratorio (1 $\mu\text{g/L}$). No se observa una superación del valor referencial que presenta la norma ANZECC/ARMCANZ (27,4 $\mu\text{g/L}$).

Estación	2007	2008	2009	2010	2011	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV
028						0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0
029						0,5	0,5		0,5	0,5	0,5	0,0
030	0,3	0,4	0,1	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,2	0,0	0,5	0,2
100	0,4	0,4	0,1	0,0	0,0				0,2	0,0	0,7	0,2
105						0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0
110						0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0
115						0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0
120	0,3	0,4	0,1	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,2	0,0	0,5	0,2
225						0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0
230						0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0
PROM	0,3	0,4	0,1	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,3	0,0	0,7	0,2

Fuente: WSP (2025)

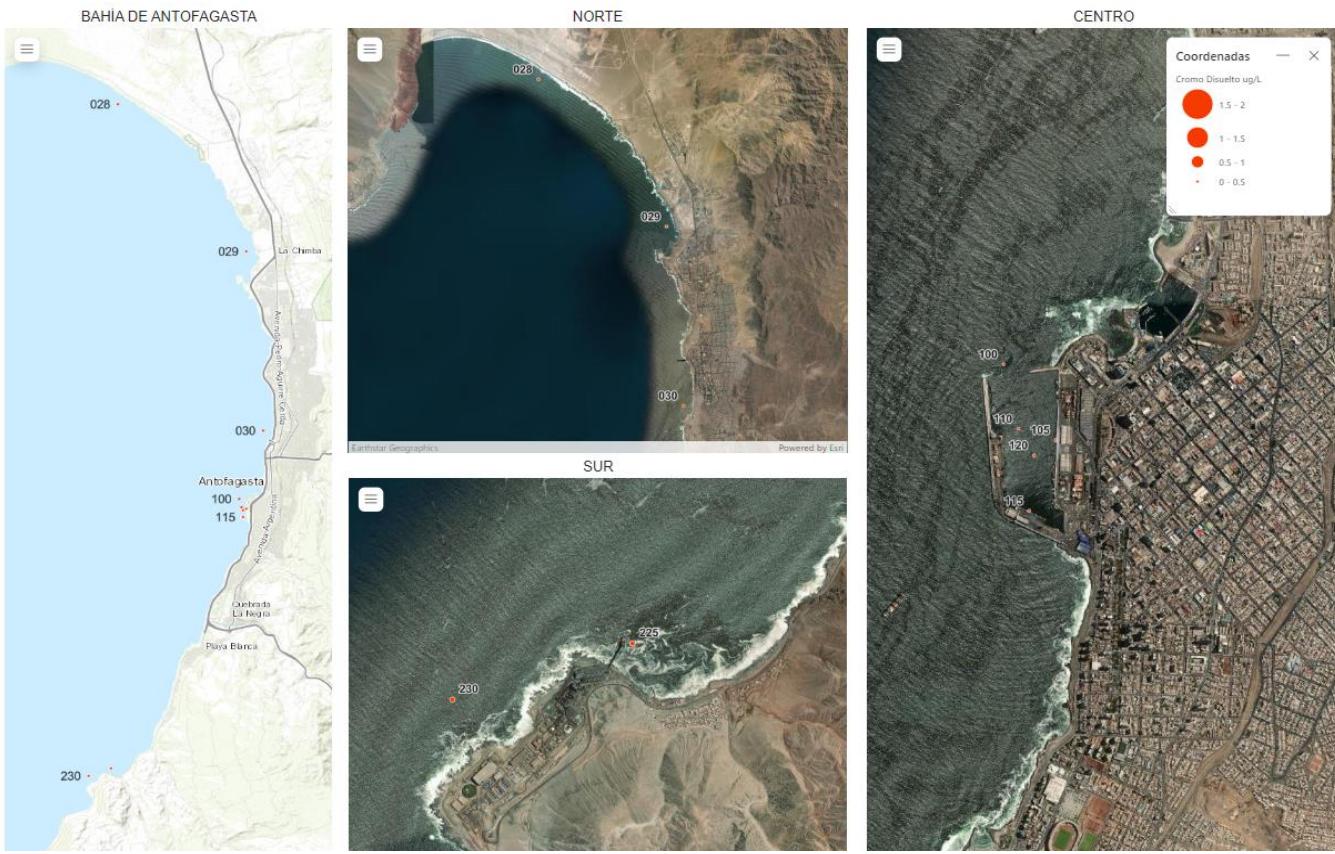
Figura 27: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cromo Disuelto ($\mu\text{g/L}$) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 28: Promedio de la concentración anual histórica de Cromo disuelto en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Cromo disuelto**, subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 29: Promedio de la concentración histórica de Cromo Disuelto por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Debido a que los valores posteriores al 2016 siempre se encontraron bajo el límite de detección, no fue posible aplicar análisis estadísticos entre sectores. Tampoco se aplicaron análisis estadísticos entre períodos para este parámetro.

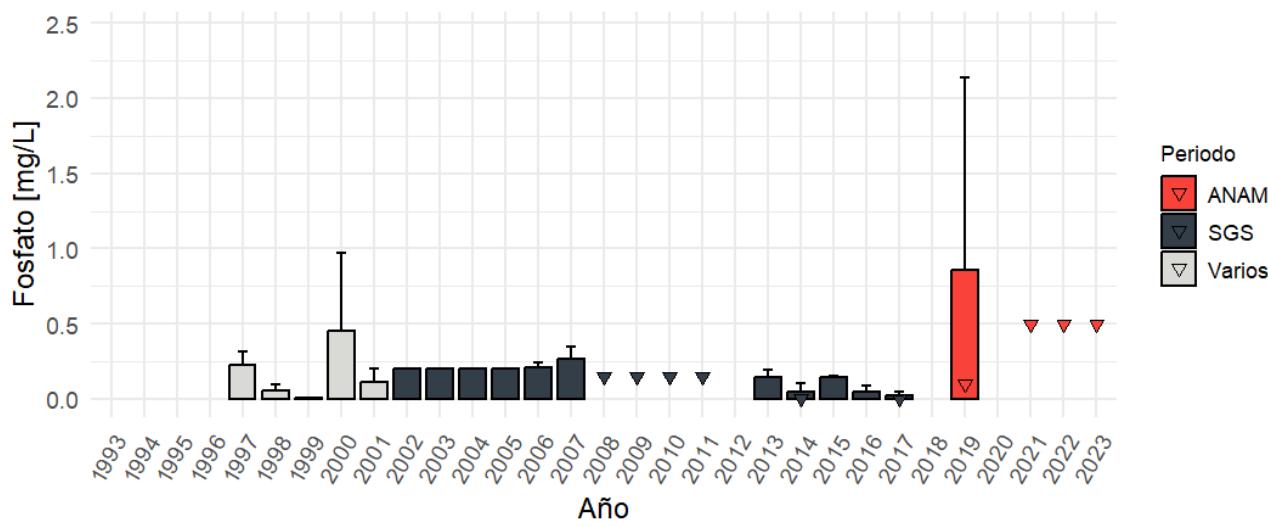
5.1.7 FOSFATO

La Figura 30 y Figura 31 muestran las concentraciones de Fosfato en mg/L desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de este parámetro varían entre <0,005 (L.D.) y 4,0 mg/L. La mayor concentración se observó en la estación 115, ubicada en el sector centro, en la zona del puerto, durante el año 2019.

Estación	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV	
028																0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3	0,1	0,0	0,3	0,1		
029																					0,1	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	
030	0,3	0,1	0,0	0,5	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3	0,1	0,0	0,9	0,1		
100	0,2	0,0	0,0	0,5	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,0	0,9	0,1
105																					1,2	0,3	0,3	0,3	0,6	0,1	2,3	0,9	
110																					1,6	0,3	0,3	0,3	0,8	0,3	2,2	0,8	
115																					2,1	0,3	0,3	0,3	1,0	0,2	4,0	1,5	
120																					0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	0,0	0,4	0,1	
220																					0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
225																					1,8	0,3	0,3	0,3	0,9	0,3	3,4	1,3	
230																					0,7	0,3	0,3	0,3	0,4	0,1	1,4	0,5	
PROM	0,2	0,1	0,0	0,5	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,9	0,3	0,3	0,3	0,2	0,0	4,0	0,5	

Fuente: WSP (2025)

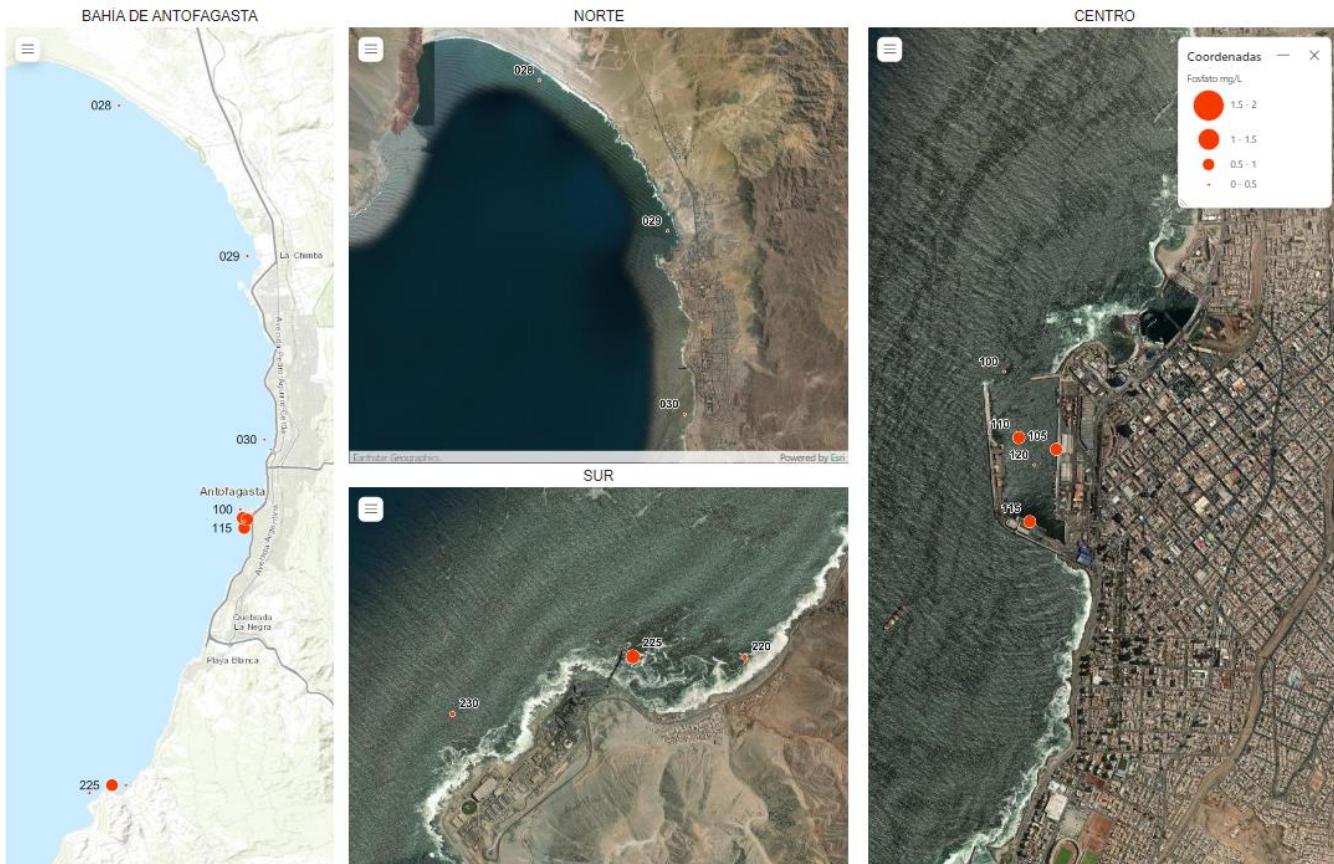
Figura 30: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Fosfato (mg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 31: Promedio de la concentración anual histórica de Fosfato en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Fosfato**, subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 32: Promedio de la concentración histórica de Fosfato por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el 2016 (Kruskal Wallis, $H=2,51$, $gl=2$, $p=0,29$). Por otro lado, si se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=35,27$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba *a posteriori* se observó que el período 2019-2023 (analizado por ANAM) se diferenció estadísticamente de los períodos 1997-2001 (analizado por varios laboratorios) y 2002-2017 (analizado por SGS) (Tabla 17).

Tabla 17: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Fosfato en la matriz de agua de mar.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	1	-
2019-2023	<0,05	<0,05

Fuente: WSP (2025)

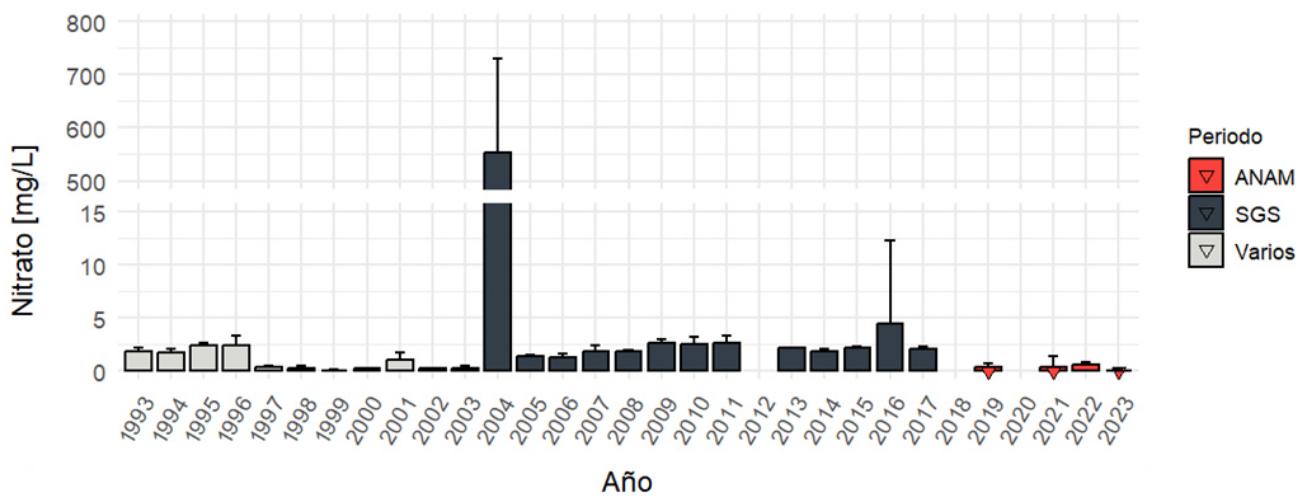
5.1.8 NITRATO

La Figura 34 y Figura 35 muestran las concentraciones de nitrato en mg/L desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de este parámetro variaron entre <0,002 (L.D.) y 735,4 mg/L. La mayor concentración se observó en la estación 120, en el sector centro, en la zona del puerto, durante el año 2004. Cabe señalar que las estaciones 030 (al norte del puerto) y 100 (en la zona del puerto), también presentaron altos valores durante ese año superando el límite establecido en la norma de referencia D.S. N° 004-2017-MINAM de 200 mg/L.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV				
028																																				
029																																				
030	1,7	1,9	2,5	2,1	0,4	0,3	0,1	0,3	0,9	0,3	0,1	547,1	1,4	1,3	2,0	2,0	2,3	3,0	2,4	2,1	1,9	2,3	2,0	2,0	0,4	0,0	0,6	0,0	19,1	0,0	704,4	100,4				
060	1,7	1,7	2,5	2,2																											2,0	1,6	2,6	0,3		
090	2,5	2,2	2,7	2,3																												2,4	1,9	2,9	0,4	
100	1,7	1,5	2,1	3,1	0,3	0,2	0,0	0,2	1,4	0,2	0,5	541,6	1,2	1,2	1,8	1,9	2,6	2,5	2,5	2,2	1,9	2,3	2,0	2,2					20,6	0,0	699,9	103,7				
105																															0,5	0,0	0,5	0,0		
110																															0,2	0,0	0,7	0,3		
115																															0,4	0,0	0,8	0,4		
120	1,6	1,6	2,0	2,0									1,1	0,2	0,2	571,2	1,5	1,5	1,9	1,8	3,0	2,2	3,2	2,1	2,1	2,3	1,9	2,1	0,4	3,1	0,9	0,2	22,9	0,0	735,4	112,1
130	1,6	1,6	2,5	2,2																										2,0	1,3	2,8	0,5			
160	2,0	2,2	2,4	2,2																												2,2	1,7	2,6	0,3	
220																															1,3	2,3	2,0	0,5		
225																															0,8	0,0	0,7	0,0		
230																															0,7	0,0	0,8	0,3		
PROM	1,8	1,8	2,4	2,3	0,4	0,3	0,1	0,2	1,1	0,2	0,2	553,3	1,4	1,3	1,9	1,9	2,6	2,6	2,7	2,1	1,9	2,2	4,4	2,1	0,4	0,4	0,6	0,1	14,7	0,0	735,4	87,5				

Fuente: WSP (2025)

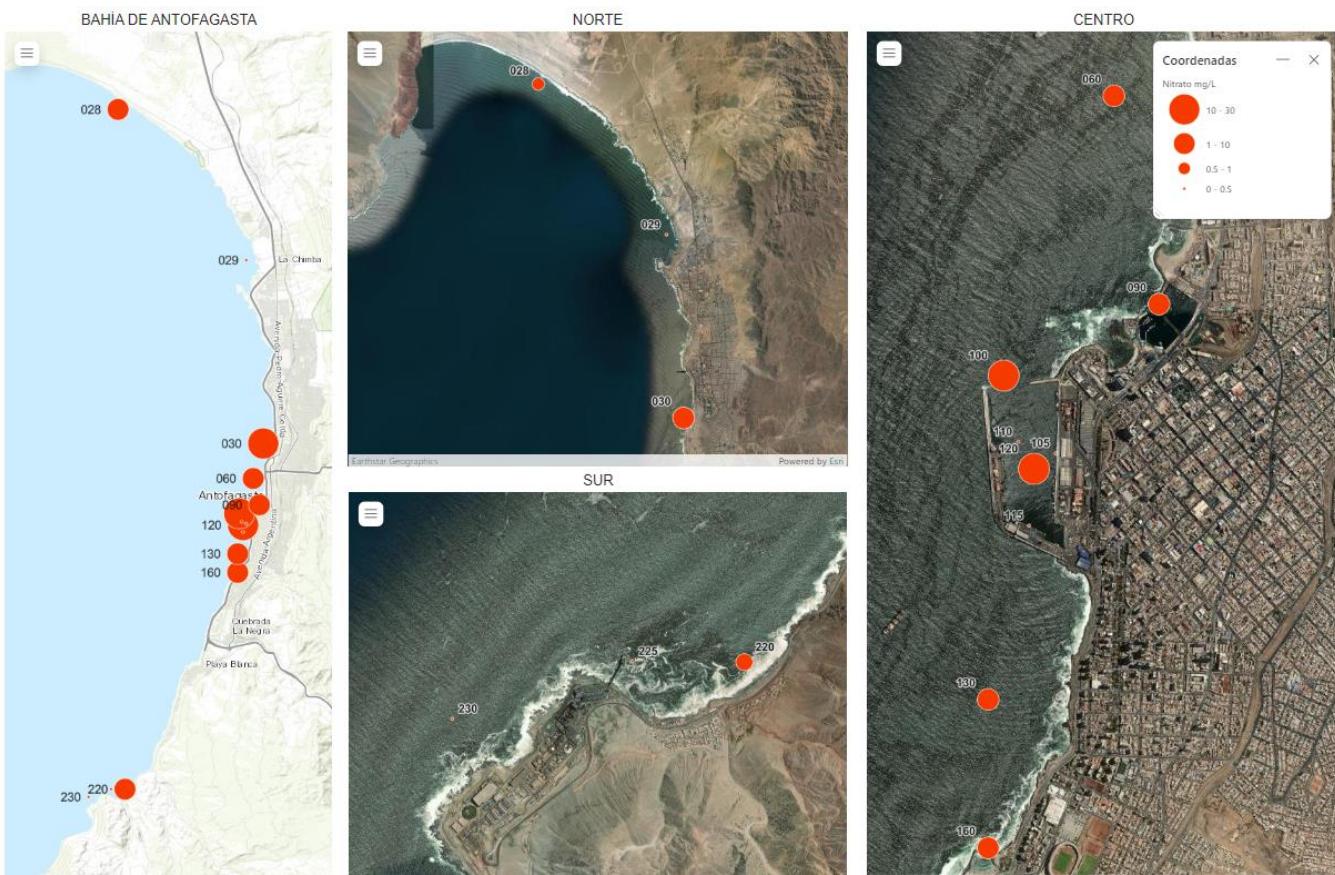
Figura 33: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Nitrato (mg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 34: Promedio de la concentración anual histórica de Nitrato en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Nitrato**, subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 35: Promedio de la concentración histórica de Nitrato por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el 2016 (Kruskal Wallis, $H=3,64$ gl=2, $p=0,16$). Por otro lado, si se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=68,22$, gl=2, $p<0,05$). Al realizar una prueba a posteriori se observó que el período 2019-2023 (analizado por ANAM) se diferenció estadísticamente de los períodos 1993-2001 (analizado por varios laboratorios) y 2002-2017 (analizado por SGS) (Tabla 18).

Tabla 18: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Nitrato en la matriz de agua de mar.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	1	-
2019-2023	<0,05	<0,05

Fuente: WSP (2025)

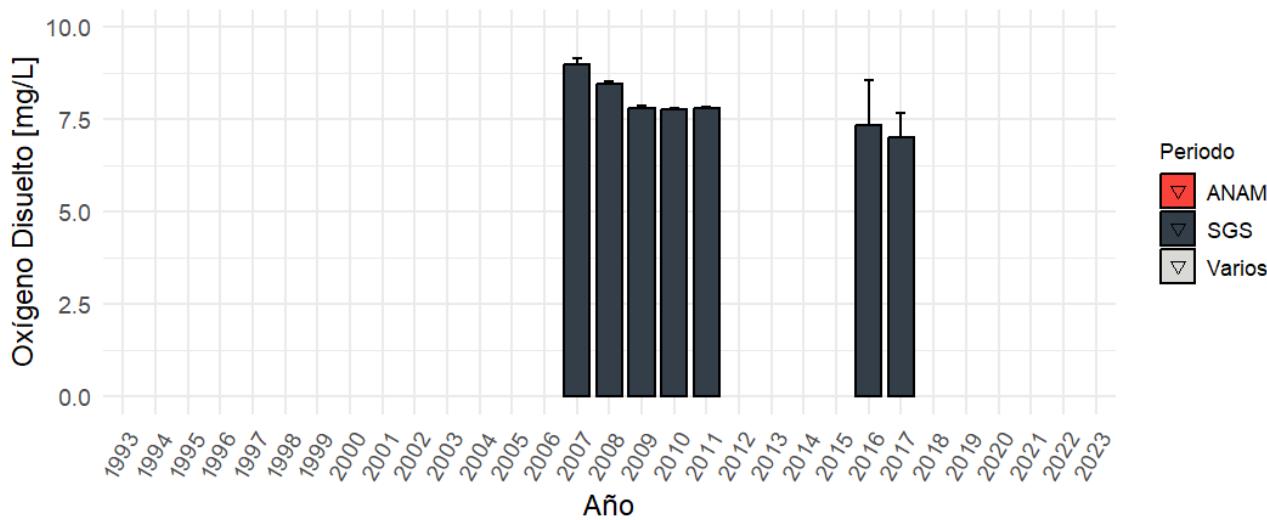
5.1.9 OXIGENO DISUELTO

La Figura 36 y Figura 37 muestran las concentraciones de oxígeno disuelto en mg/L desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existen periodos sin información entre el año 1993 y el año 2006, entre el año 2012 y 2015, así como también desde el año 2019 al 2023. Durante el periodo en el cual si se registró el parámetro las concentraciones históricas variaron entre 5,0 y 9,3 mg/L. Tanto la menor concentración de oxígeno en el año 2016, como la mayor en el año 2007, se observaron en la estación 100, en el sector centro, en la zona del puerto. Cabe señalar que las concentraciones de oxígeno estuvieron sobre el límite establecido en el D.S. N° 004-2017-MINAM para la conservación del ambiente acuático (≥ 4 mg/L).

Estación	2007	2008	2009	2010	2011	2016	2017	PROM	MIN	MAX	DESV
028						7,5	8,0	7,8	7,0	8,0	0,4
030	8,9	8,4	7,8	7,7	7,8	8,0	7,0	8,0	7,0	9,0	0,5
100	9,1	8,4	7,8	7,7	7,8	5,0	7,0	7,9	5,0	9,3	0,9
120	8,9	8,4	7,8	7,8	7,8	8,0	6,5	8,0	6,0	9,0	0,6
220						8,0	6,5	7,0	6,0	8,0	0,8
PROM	9,0	8,4	7,8	7,7	7,8	7,3	7,0	7,9	5,0	9,3	0,7

Fuente: WSP (2025)

Figura 36: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Oxígeno Disuelto (mg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 37: Promedio de la concentración anual histórica de Oxígeno disuelto en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Oxígeno Disuelto** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 38: Promedio de la concentración histórica de Oxígeno Disuelto por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=4,73$, $gl=2$, $p=0,16$). No se pudieron analizar distintos períodos, ya que sólo hay información entre los años 2007 y 2017.

5.1.10 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

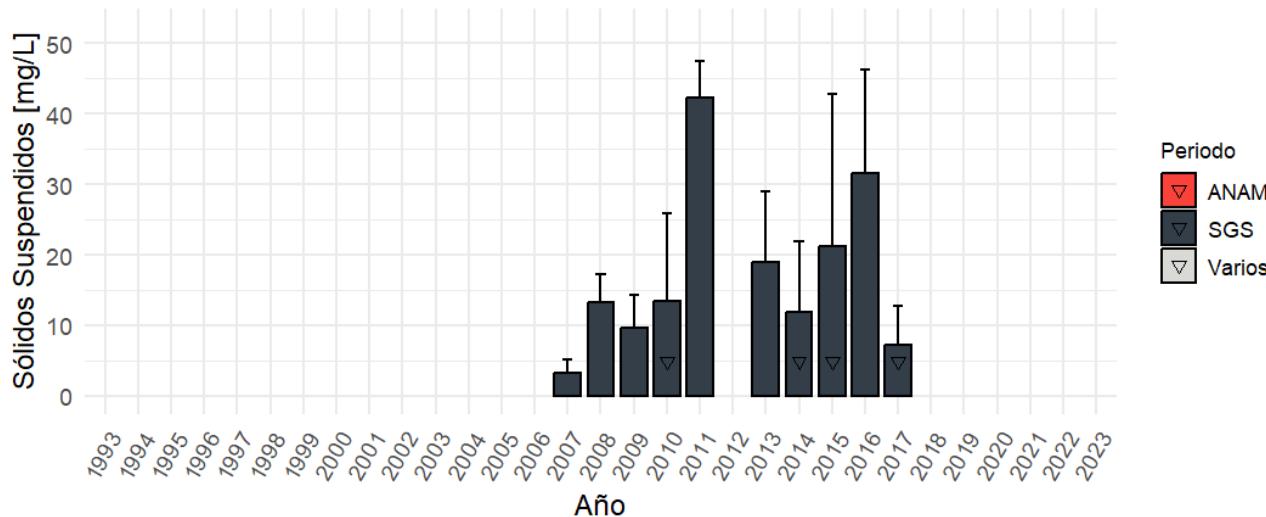
La Figura 39 y Figura 40 muestran las concentraciones de sólidos suspendidos totales en mg/L desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existen periodos sin información entre el año 1993 y el año 2006, así como también desde el año 2019 al 2023. Durante el periodo en el cual, si se registró el parámetro las concentraciones históricas de SST varían entre 1 y 53 mg/L. El mayor valor se observa en la estación 100, en el sector centro, en la zona del puerto, durante el año 2015.

Al comparar con la norma de referencia, se observa una superación del límite establecido por el D.S. N° 004-2017-MINAM de 30 mg/L, durante el 2011, 2015 y 2016, principalmente en las estaciones 028, 030, 100 y 120, las que corresponden al sector Norte y Puerto.

Estación	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	PROM	MIN	MAX	DESV
028							12,8	11,8	40,5	4,8	17,4	2,5	43,0	15,4
030	3,1	13,8	6,1	15,5	37,0	29,0	11,3	25,3	26,5	6,3	16,2	1,0	48,0	14,8
100	3,4	11,3	11,5	11,3	43,8	9,0	11,3	25,8	31,5	6,8	16,7	1,5	49,0	15,8
120	3,3	14,8	11,5	13,8	46,3	19,0	12,3	21,8	23,0	8,3	17,5	1,0	53,0	15,3
220								41,0	9,8	20,2	2,5	41,0	15,9	
PROM	3,3	13,3	9,7	13,5	42,3	19,0	11,9	21,1	31,6	7,2	16,9	1,0	53,0	15,3

Fuente: WSP (2025)

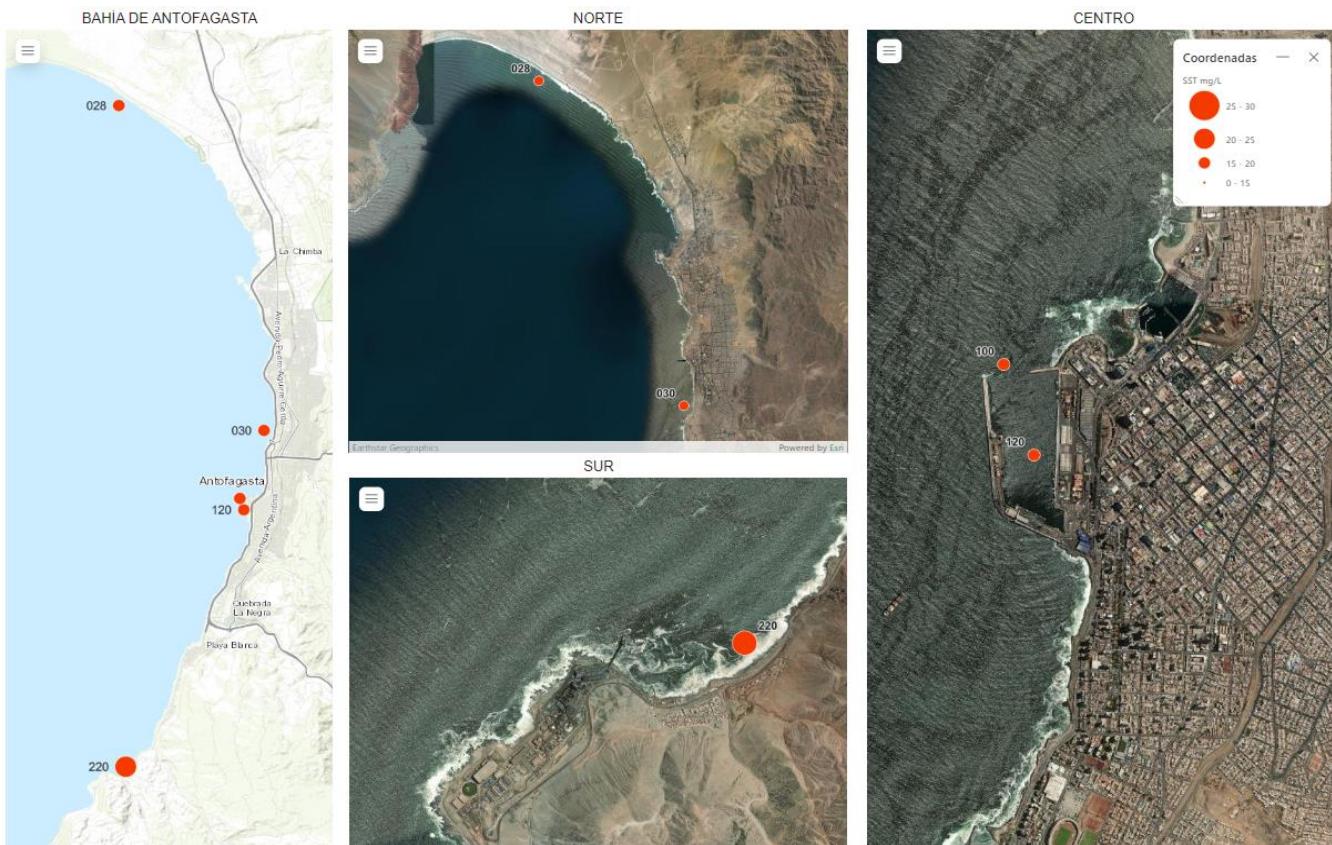
Figura 39: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Solidos Suspendedos Totales (mg/L) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 40: Promedio de la concentración anual histórica de los Sólidos Suspendedos Totales en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Solidos Suspendedos Totales** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 41: Promedio de la concentración histórica de Solidos Suspendedos Totales por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=0,14$, $gl=2$, $p=0,93$). No se pudieron analizar distintos períodos, ya que sólo hay información entre los años 2007 y 2017.

5.1.11 ZINC DISUELTO

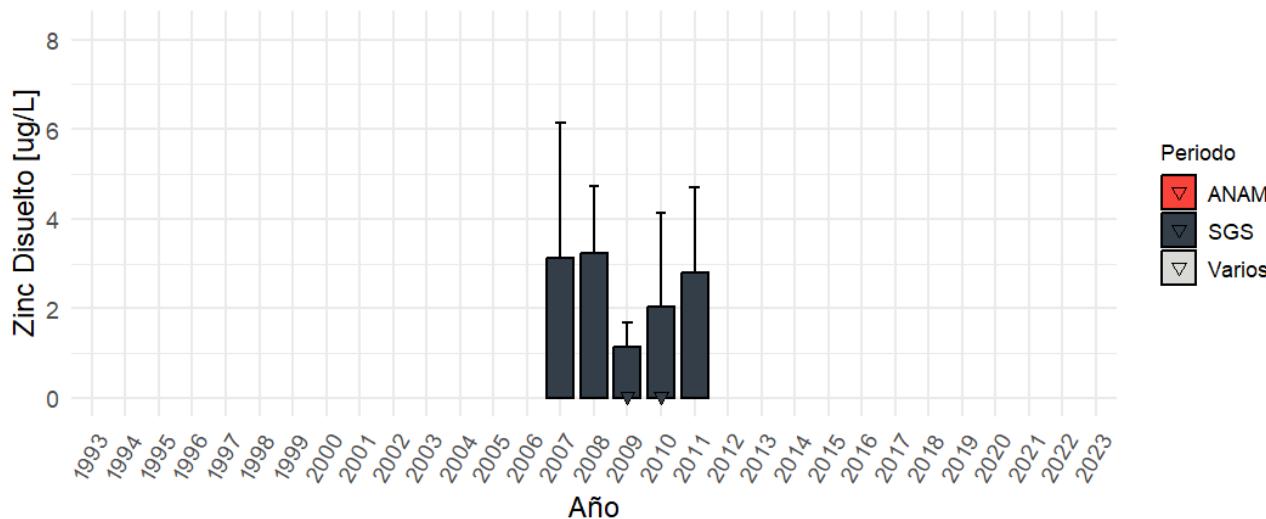
La Figura 42 y Figura 43 muestran las concentraciones de Zinc disuelto en $\mu\text{g/L}$ desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existen periodos sin información entre el año 1993 y el año 2006, así como también desde el año 2012 al 2023. Durante el periodo en el cual, si se registró el parámetro las concentraciones variaron entre 0,2 y 10,7 $\mu\text{g/L}$. La mayor concentración se observó en la estación 100, ubicada en el sector centro, al norte del puerto. en el año 2008.

Al respecto, es importante señalar que este parámetro sólo fue medido en 3 estaciones, todas ubicadas en el mismo sector. Además, sólo se monitoreó durante los años 2007 y 2011. Finalmente, no se observa una superación del valor referencial que presenta la norma ANZECC/ARMCANZ (15 $\mu\text{g/L}$).

Estación	2007	2008	2009	2010	2011	PROM	MIN	MAX	DESV
030	3,3	3,3	1,4	2,1	2,6	2,5	0,0	7,3	2,3
100	3,3	3,2	0,7	2,9	2,9	2,6	0,0	10,7	2,8
120	2,8	3,2	1,3	1,2	3,0	2,3	0,0	5,2	1,8
PROM	3,1	3,2	1,1	2,0	2,8	2,5	0,0	10,7	2,4

Fuente: WSP (2025)

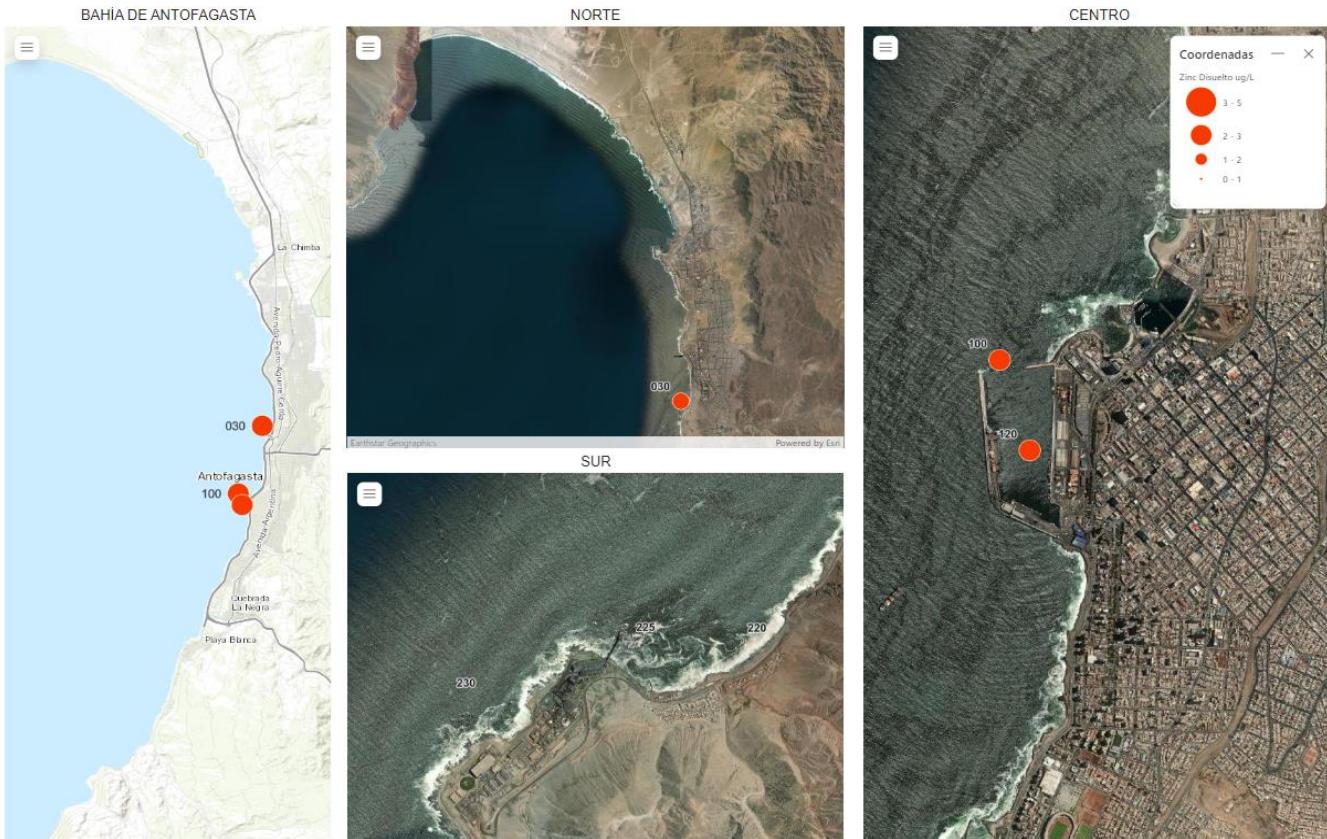
Figura 42: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Zinc Disuelto ($\mu\text{g/L}$) en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Color amarillo/rojo indica valores iguales/sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 43: Promedio de la concentración anual histórica del Zinc Disuelto en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Zinc Disuelto** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 44: Promedio de la concentración histórica de Zinc Disuelto por estación en la matriz de agua de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Dada la cantidad de estaciones y años monitoreados, no fue posible realizar análisis estadísticos para este parámetro.

5.2 MATRIZ DE SEDIMENTO

A continuación, se presenta el análisis de los parámetros de la matriz de sedimento. Tras una revisión de la normativa chilena aplicable a la matriz de sedimento, se pudo constatar la no existencia de una Norma Secundaria para el sector, por tal razón, los resultados son comparados con las “Listas de Acción para el material de dragado” desarrollado el 2017 por la Organización Marítima Internacional (OMI) (Tabla 19). Este estándar ha sido consensuado por el grupo Científico del Protocolo de Londres y tiene características más conservadoras, que por ejemplo las Recomendaciones de Calidad ANZECC/ARMCANZ, 2000. Además, para el caso de la materia orgánica, se usó como referencia el límite de aceptabilidad establecido en la Res. Ex. N°3612 y sus modificaciones, para centros de cultivo hidrobiológicos (<9 %).

Tabla 19: Recomendaciones de Calidad para sedimentos de dragados de la OMI.

Contaminante (mg/kg)	Efecto Mínimo	Efecto máximo
Arsénico (mg/kg)	7,4	48,8
Cadmio (mg/kg)	0,7	4,55
Cromo (mg/kg)	52,3	265
Cobre (mg/kg)	32	275
Mercurio (mg/kg)	0,14	0,703
Plomo (mg/kg)	30,2	257,5
Zinc (mg/kg)	124	410

Fuente: WSP (2025) en base a OMI (2017).

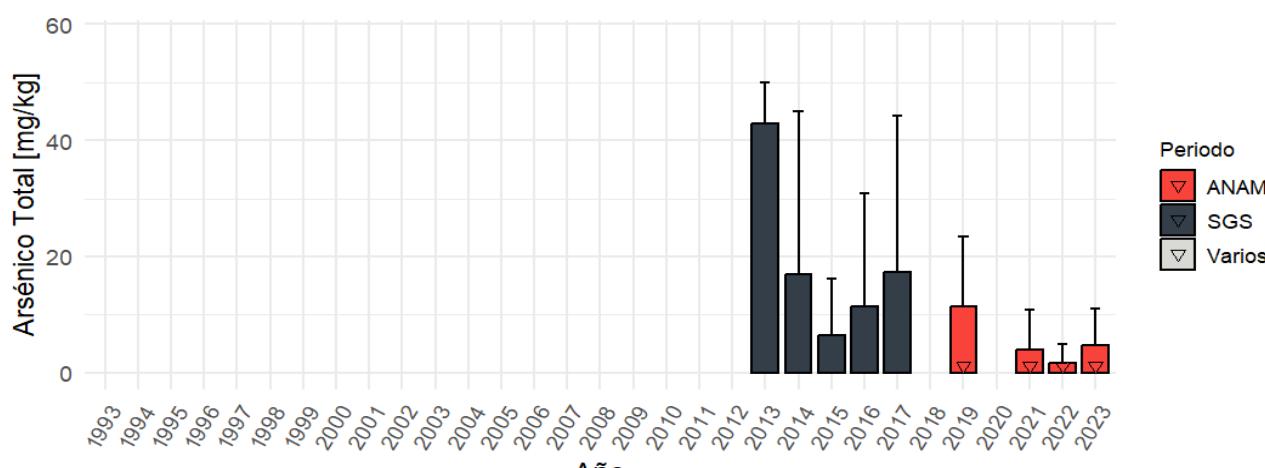
5.2.1 ARSÉNICO TOTAL

La Figura 45 y Figura 46 muestran las concentraciones de arsénico total en mg/kg correspondientes al período comprendido entre 1993 y 2023. Se observa que el período comprendido entre los años 1993 y 2012 no ha sido incluido en la matriz, lo cual se debe a que no se dispone de información para dicho período. Las concentraciones históricas del período que si fue monitoreado variaron entre 0,2 y 91,0 mg/kg, observándose una disminución en el tiempo. La mayor concentración se observó en la estación 110, en el sector centro, en la zona del puerto, durante el año 2014. Se observa superación del límite referencial de la OMI (2017) de efecto mínimo (7,4 mg/kg) y máximo (48,8 mg/kg). Este último fue superado durante los años 2013, 2014, 2016 y 2017 en la estación 080, 090 y 110.

Estación	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV
028		4,0	0,7	1,6	1,8	3,4	0,6	0,6	2,0	2,0	0,4	7,6	2,2
029						3,3	0,6	0,6	0,6	1,7	0,6	6,0	2,1
030		3,7	3,0	4,3	3,9	2,0	0,6	0,6	0,6	2,7	0,6	6,1	1,9
050	36,5		5,4	4,1	5,3					10,1	2,7	36,5	11,8
080	46,5		3,8	7,3	5,2					12,3	1,7	46,5	15,6
090	53,6	27,0	13,0	17,4	42,2	30,1	16,0	10,9	0,6	25,2	0,6	53,6	14,3
105						13,3	0,6	0,6	15,4	8,6	0,6	15,4	6,6
110	39,4	85,5	25,1	35,8	66,9	8,7	0,6	0,6	7,6	35,2	0,6	91,0	33,5
115						9,8	0,6	0,6	0,6	4,3	0,6	11,0	4,6
120						36,7	18,2	0,6	16,3	21,7	0,6	38,8	13,8
150		2,9	1,0	1,3	1,7					1,7	0,5	4,9	1,3
170	38,0	2,7	1,0	19,4	1,5					9,7	0,2	38,0	15,2
220				2,6	3,1					2,9	2,2	4,0	0,8
225						4,0	0,6	0,6	0,6	2,0	0,6	5,1	1,8
230						3,2	0,6	0,6	2,6	2,0	0,6	5,8	2,0
PROM	42,8	16,9	6,5	11,5	17,3	11,5	3,9	1,6	4,7	11,5	0,2	91,0	18,6

Fuente: WSP (2025)

Figura 45: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Arsénico Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.



Fuente: WSP (2025)

Figura 46: Promedio de la concentración anual histórica de Arsénico total en matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se presenta un mapa temático de la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del **Arsénico total**, en las tres zonas definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 47: Promedio de la concentración histórica de Arsénico Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados desde el 2016 (Kruskal Wallis, $H=10,08$, $gl=2$, $p<0,05$). Al hacer una prueba *a posteriori*, se determinó que las diferencias se encuentran entre el sector Norte y Puerto ($p<0,05$). De igual forma, al realizar la prueba no paramétrica entre períodos de tiempo, se observaron diferencias significativas (Kruskal Wallis, $H=8,04$ $gl=1$ $p<0,05$) entre el periodo 2013-2017 (analizado por SGS) y el periodo 2019-2023 (analizado por ANAM) (Tabla 20).

Tabla 20: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Arsénico total en la matriz de sedimento. s/d=sin dato

	Sector			Periodo	
	Norte	Puerto		1993-2001	2002-2017
Puerto	<0,05	-	2002-2017	s/d	-
Sur	1	0,09	2019-2023	s/d	<0,05

Fuente: WSP (2025)

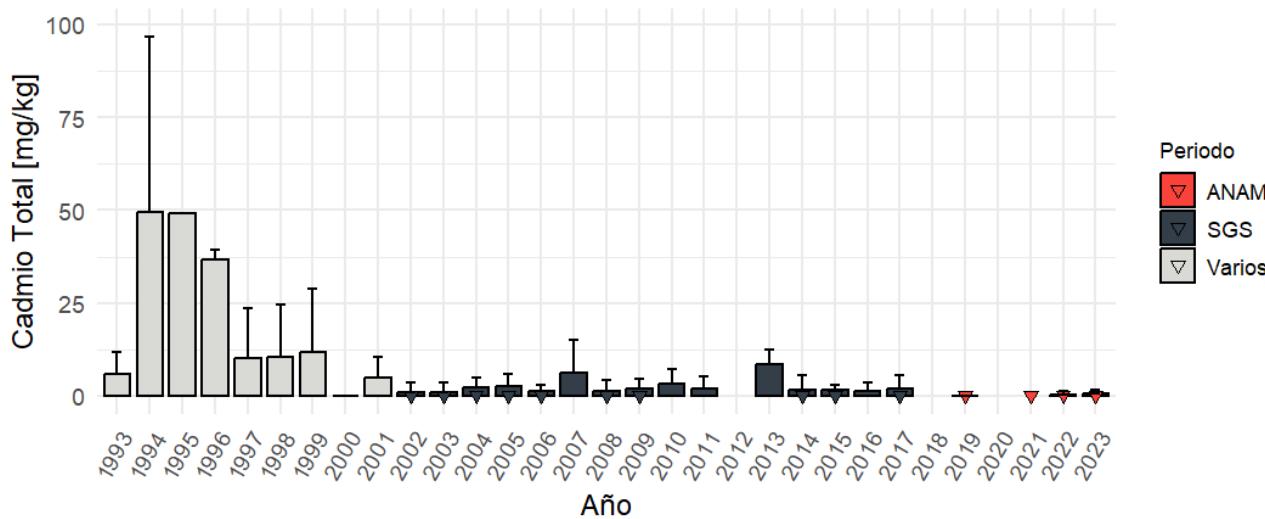
5.2.2 CADMIO TOTAL

La Figura 48 y Figura 49 muestran las concentraciones de cadmio total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de este parámetro en el sedimento variaron entre 0,005 y 156 mg/kg, observándose una disminución en el tiempo. La mayor concentración se observó en la estación 090, en el sector centro, al norte del puerto de Antofagasta, durante el año 1994. Se observa superación del límite referencial de la OMI (2017) de efecto mínimo (0,7 mg/kg) y máximo (4,55 mg/kg). Este último fue superado entre los años 1993 y 2023, exceptuando el año 2019 al 2021.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV																					
028																				0,1	1,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,1	2,4	0,6																						
029																													0,1	0,1	0,1	0,0																					
030																				0,1	0,4	1,9	0,5	0,1	0,9	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,0	7,2	1,4																			
050																				0,1	0,1	0,5	1,4	0,4	2,8	0,2	0,4	1,2	6,5	7,1	0,1	0,5	0,1	1,8	0,0	12,5	2,8																
080																				0,1	0,1	0,5	2,4	0,6	1,9	0,4	0,5	2,7	0,6	13,0	0,1	1,5	0,0	13,0	2,5																		
090																				96,9	49,1	37,3	17,3	40,4	22,3	0,0	14,8	0,1	2,6	6,2	6,2	2,8	7,7	7,5	7,5	3,1	1,0	5,7	4,0	0,9	2,1	2,9	0,1	0,1	0,1	14,3	0,0	156,0	26,2				
100																				10,1	49,3																29,7	10,1	49,3	19,6													
105																				32,2	16,8	10,7	0,0	6,1	3,4	4,2	6,5	5,1	3,2	25,5	1,2	2,7	9,0	2,9	4,5	9,6	4,6	4,1	10,1	0,1	0,1	0,1	3,7	0,7	0,1	2,7	1,0						
110																				32,2	16,8	10,7	0,0	6,1	3,4	4,2	6,5	5,1	3,2	25,5	1,2	2,7	9,0	2,9	4,5	9,6	4,6	4,1	10,1	0,1	0,1	0,1	3,7	7,4	0,0	43,3	9,2						
115																																	0,1	0,1	0,1	0,0																	
120																				2,1	1,8	25,2	0,0	2,5	0,1	0,1	0,1	1,2	0,2	1,5	0,5	0,4	2,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0				
150																				5,0	3,8	16,8	0,0	1,2	0,1	0,1	0,5	1,2	0,3	2,0	0,1	0,7	1,9	0,7	12,0	0,1	0,9	2,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
170																																								2,3	0,0	31,1	5,3										
220																																								0,1	0,1	0,1	0,0										
225																																								0,1	0,1	0,1	0,0										
230																																								0,1	0,1	0,1	0,0										
PROM	5,8	61,3	49,1	37,3	10,2	10,5	11,8	0,0	4,7	0,5	1,0	2,1	2,7	1,1	6,1	1,4	1,8	3,2	1,8	8,5	1,8	1,5	1,3	2,0	0,1	0,1	0,3	0,5	4,3	0,0	156,0	12,5																					

Fuente: WSP (2025)

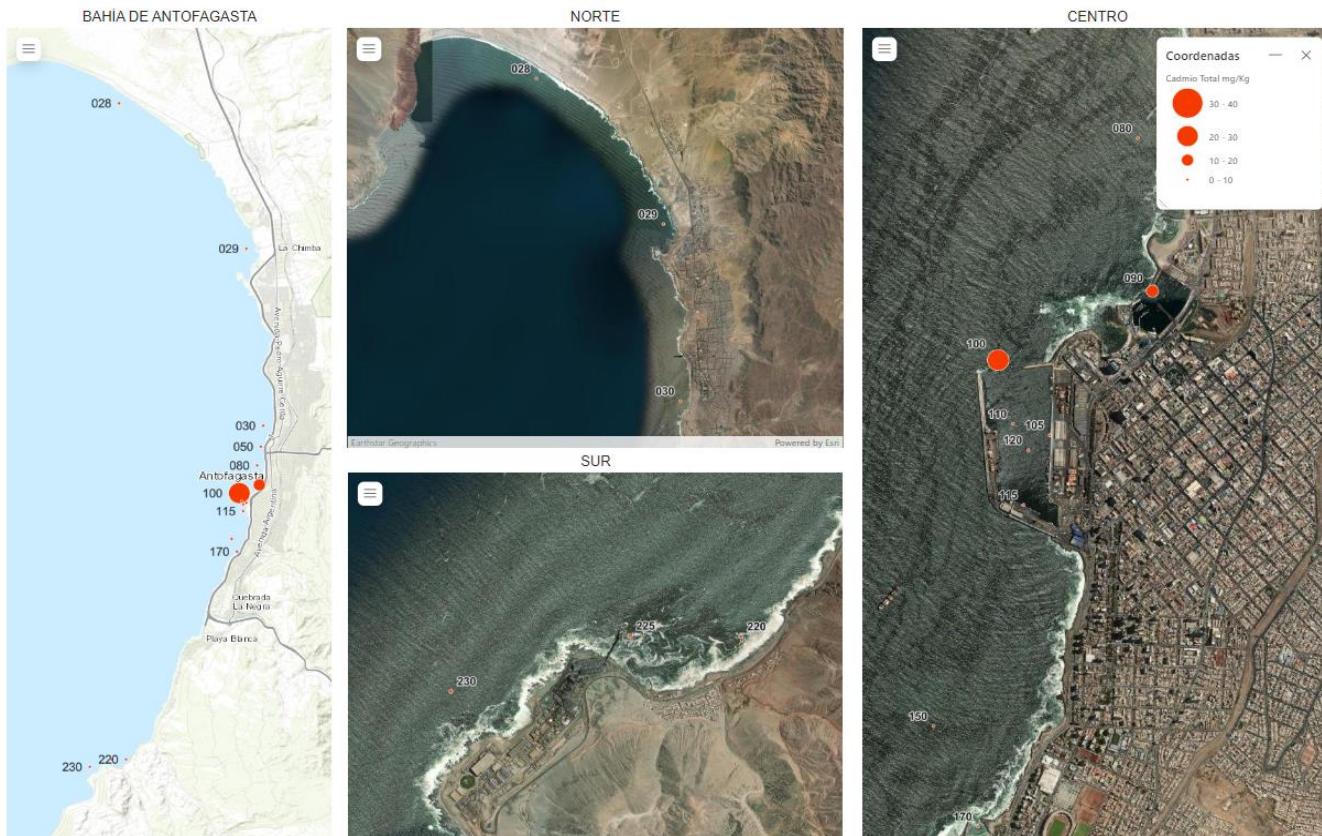
Figura 48: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cadmio Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.



Fuente: WSP (2025)

Figura 49: Promedio de la concentración anual histórica del Cadmio total en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se presenta un mapa temático de la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del **Cadmio total**, en las tres zonas definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 50: Promedio de la concentración histórica de Cadmio Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=4,80$, $gl=2$, $p=0,09$). Por otro lado, si se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=60,78$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba *a posteriori* se observaron diferencias significativas entre todos los períodos analizados (Tabla 21).

Tabla 21: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Cadmio total en la matriz de sedimento.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	<0,05	-
2019-2023	<0,05	<0,05

Fuente: WSP (2025)

5.2.3 COBRE TOTAL

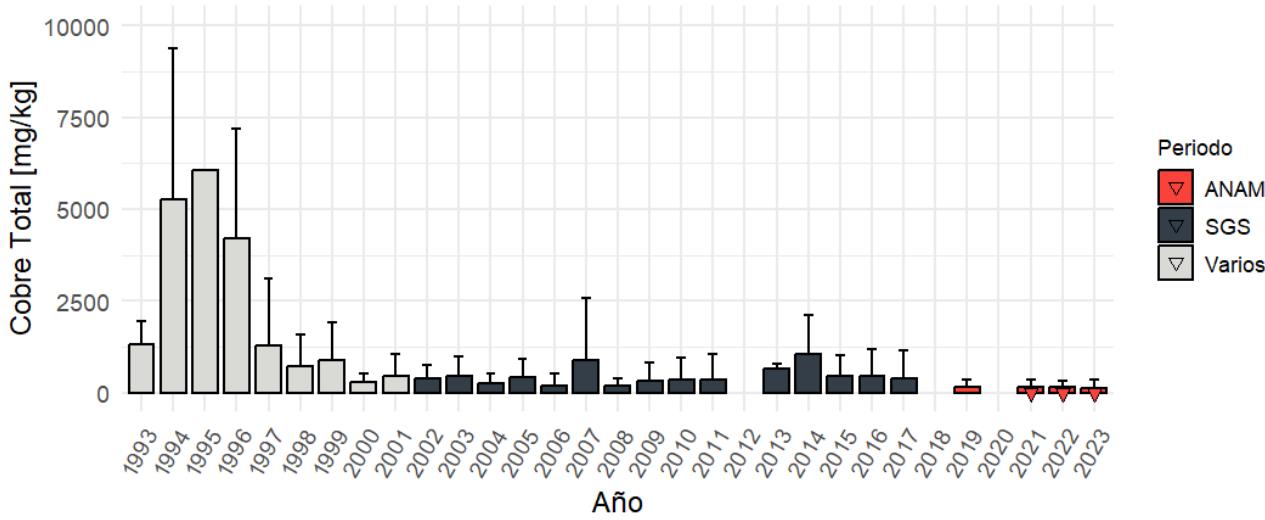
La Figura 51 y Figura 52 muestran las concentraciones de cobre total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de este parámetro en el sedimento variaron entre 0,5 y 11.428 mg/kg, observándose una disminución en el tiempo. La mayor concentración se observó en la estación 100, en el sector centro, en la zona del puerto, durante el año 1994.

Se observa superación del límite referencial de la OMI (2017) de efecto mínimo (32 mg/kg) y máximo (275 mg/kg), durante todo el periodo analizado, principalmente en las estaciones ubicadas en la zona del puerto de Antofagasta.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV		
028																					1.113,5	43,5	14,4	15,1	8,4	0,7	9,4	11,8	185,5	0,7	2.214,0	585,9		
029																															9,6	0,7	14,4	4,9
030																															562,6	29,2	2.794,0	534,4
050	1.780,0	1.490,0																													579,1	10,9	2.854,0	674,2
060		245,6	577,9	745,9	261,5	169,4	179,0	965,5	358,0	196,5	224,2	53,8	158,0	303,5	119,4	1.244,0	653,0	1.018,5	838,0	611,0									382,0	12,1	1.411,0	373,9		
090	4.672,5	6.046,0	4.900,7	1.649,6	1.372,3	905,7	391,5	635,5	177,6	446,5	619,0	620,5	430,0	462,0	486,0	420,5	329,5	165,2	560,0	422,0	177,0	281,1	339,4	288,6	95,8	78,9	66,1	1.171,1	56,2	11.428,0	2.182,1			
100	892,2	9.654,0																													5.273,1	892,2	9.654,0	4.380,9
105																															221,4	90,2	444,5	149,6
110		3.968,3	1.965,5	1.127,9	511,5	1.411,4	917,0	1.059,0	485,0	825,5	609,2	4.736,5	286,6	1.009,1	1.423,5	722,5	445,0	2.303,0	1.394,0	1.076,2	2.077,7	151,3	173,0	152,6	228,4	1.318,1	90,2	444,5	124,9					
115																															167,6	257,6	367,7	61,6
120																															204,3	61,6	367,7	103,7
150	69,3	23,0	729,9	32,0	25,4	26,6	27,6	44,1	34,1	24,9	31,0	51,6	7,7	14,0	19,3	37,0	39,6	9,9	13,0									208,7	135,7	290,0	58,5			
170	117,5	61,6	1.886,1	19,2	30,5	16,7	20,0	7,5	18,8	10,2	11,6	26,8	8,6	14,9	11,5	768,0	39,5	38,5	1.129,5	13,6								203,3	2,0	3.731,0	689,8			
220																															45,2	39,6	41,5	39,3
225																															37,9	21,5	26,5	42,1
230																															6,3	0,7	0,7	4,3
PROM	1.336,1	5.122,3	6.046,0	4.900,7	1.294,2	712,1	906,9	287,0	457,3	380,2	466,7	264,7	440,8	210,6	894,7	199,0	323,4	351,9	347,6	651,0	1.040,9	472,7	445,5	397,6	167,5	147,3	157,3	143,2	606,4	0,5	11.428,0	1.270,6		

Fuente: WSP (2025)

Figura 51: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cobre Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.

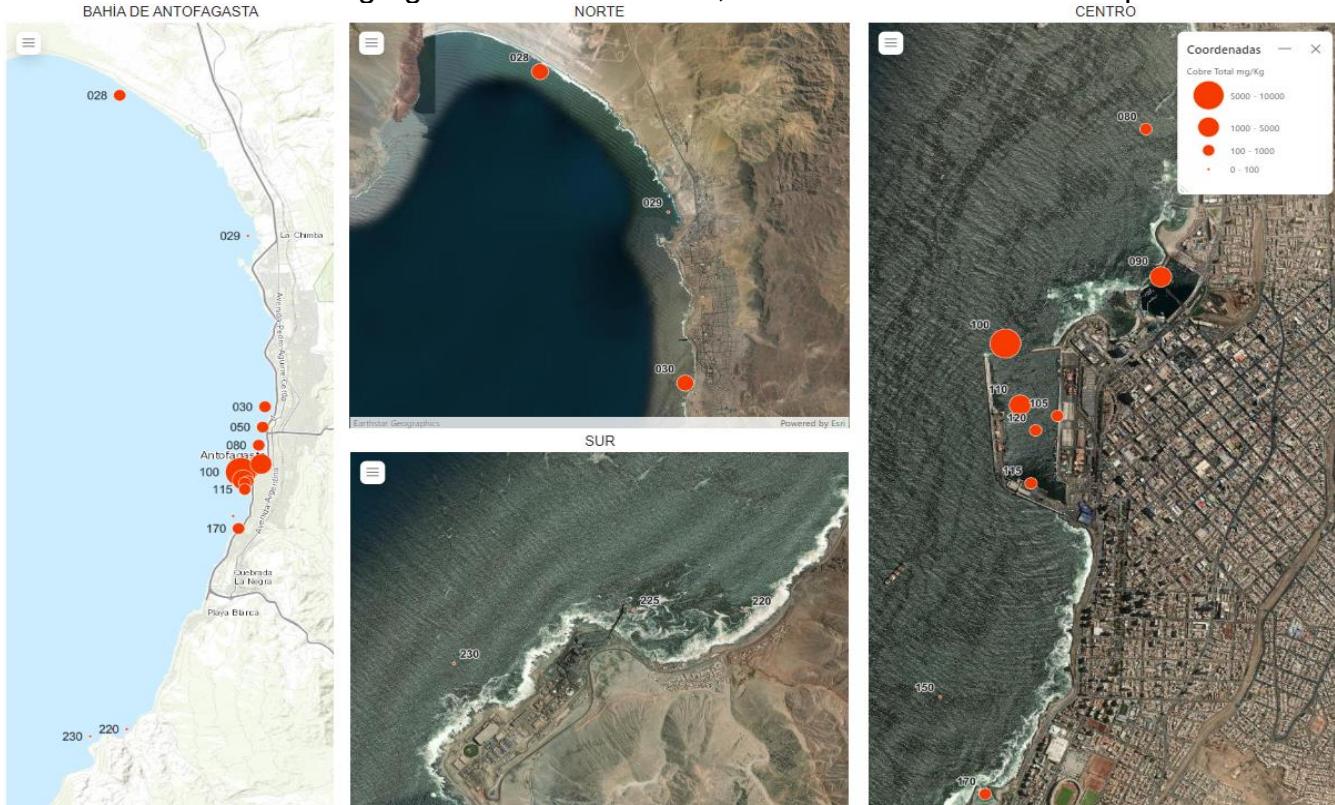


Fuente: WSP (2025)

Figura 52: Promedio de la concentración anual histórica del Cobre total en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se presenta un mapa temático de la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de

concentración histórica agregada del Cadmio total, en las tres zonas definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 53: Promedio de la concentración histórica de Cobre Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=35,67$, $gl=2$, $p<0,05$). Al hacer una prueba *a posteriori*, se determinó que las diferencias significativas se encuentran entre los sectores Norte y Puerto, y los sectores Puerto y Sur (Tabla 22).

De igual forma, al realizar la prueba no paramétrica entre períodos de tiempo, se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=29,83$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba *a posteriori* se observaron diferencias significativas entre todos los períodos analizados (Tabla 22).

Tabla 22: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Cobre total en la matriz de sedimento.

Sector			Periodo		
	Norte	Puerto		1993-2001	2002-2017
Puerto	<0,05	-	2002-2017	<0,05	-
Sur	1	<0,05	2019-2023	<0,05	<0,05

Fuente: WSP (2025)

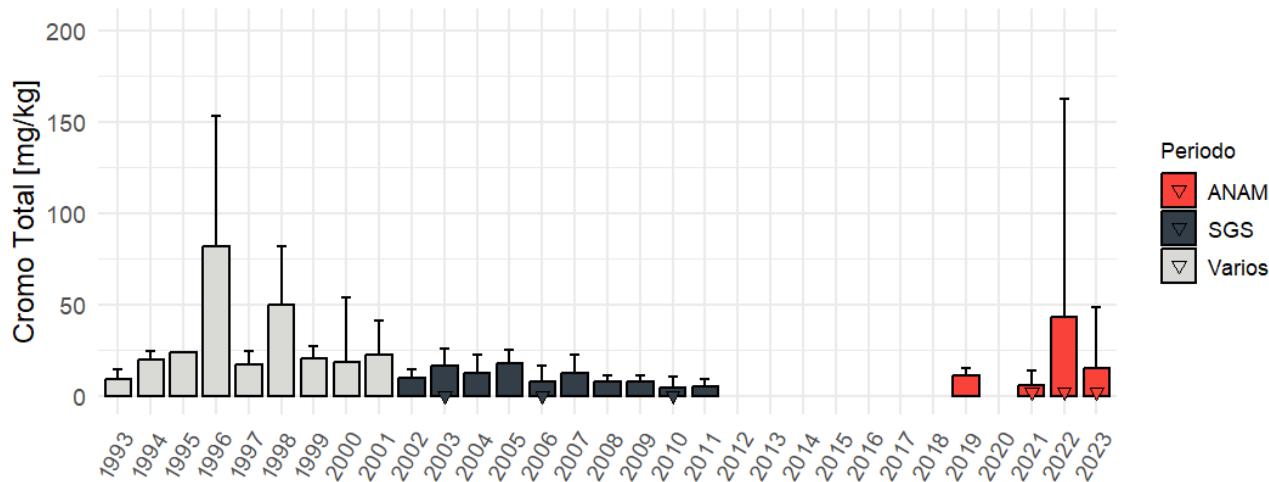
5.2.4 CROMO TOTAL

La Figura 54 y Figura 55 muestran las concentraciones de cromo total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existe un periodo sin información entre el año 2012 y el año 2018. Las concentraciones históricas en el sedimento del periodo que si fue monitoreado variaron entre 0,25 y 383,0 mg/kg. La mayor concentración se observó en la estación 105, en el sector centro, en la zona del puerto de Antofagasta, durante el año 2022. Se observa superación del límite referencial de la OMI (2017) de efecto mínimo (52,3 mg/kg) y máximo (265 mg/kg). Este último es superado sólo el año 2022.

Estación	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	PROM	MIN	MAX	DESV
028																													12,4	1,2	6,9	8,5			
029																													5,1	1,2	1,2	1,2			
030						10,8	42,1	18,3	7,1	38,9	5,8	15,6	8,9	24,8	5,2	4,4	5,2	4,7	3,6	3,6	9,4	1,2	3,9	1,2	11,9	0,3	67,3	15,0							
050	6,1	16,0				7,2	47,5	16,6	7,1	15,2	5,1	4,1	15,7	15,0	4,7	4,1	6,0	5,4	2,0	9,2								11,0	0,3	74,4	13,7				
080						6,3	47,1	20,0	5,3	5,4	7,6	21,1	1,5	19,3	10,7	8,8	7,8	5,5	6,4	4,0								12,3	0,3	75,8	14,3				
090			25,0	23,9	98,9	23,6	61,7	25,5	21,2	44,5	14,1	24,9	29,4	28,2	15,8	15,6	12,9	11,8	3,6	5,7	12,7	19,4	9,7	1,2	27,1	0,3	247,0	38,7							
100			12,9	18,8																							15,9	12,9	18,8	2,9					
105																											12,1	1,2	383,0	109,4					
110						20,8	41,2	20,7	73,7	19,9	16,6	15,6	13,9	15,0	10,3	31,4	5,4	9,4	9,8	6,0	9,8	1,2	1,2	5,7	18,9	0,3	139,0	24,5							
115																											11,2	1,2	1,2	1,2					
120																											20,4	17,7	14,8	16,5					
150			18,8	46,9	23,2	10,2	18,1	7,2	14,3	16,9	12,8	5,9	16,4	9,3	8,5	2,7	5,3									14,3	0,3	70,7	13,3						
170			21,5	63,7	21,7	7,6	18,0	12,3	22,0	1,9	14,1	5,0	6,7	9,0	10,2	4,2	5,5									15,3	0,3	104,1	18,3						
225																											12,9	14,6	7,2	1,2					
230																											5,7	1,2	1,2	4,6					
PROM	9,5	21,2	23,9	98,9	17,0	50,0	20,9	18,9	22,9	9,8	16,8	12,6	18,0	8,2	12,5	7,9	7,9	4,6	5,6	11,2	6,0	43,0	15,1	17,2	0,3	383,0	32,6								

Fuente: WSP (2025)

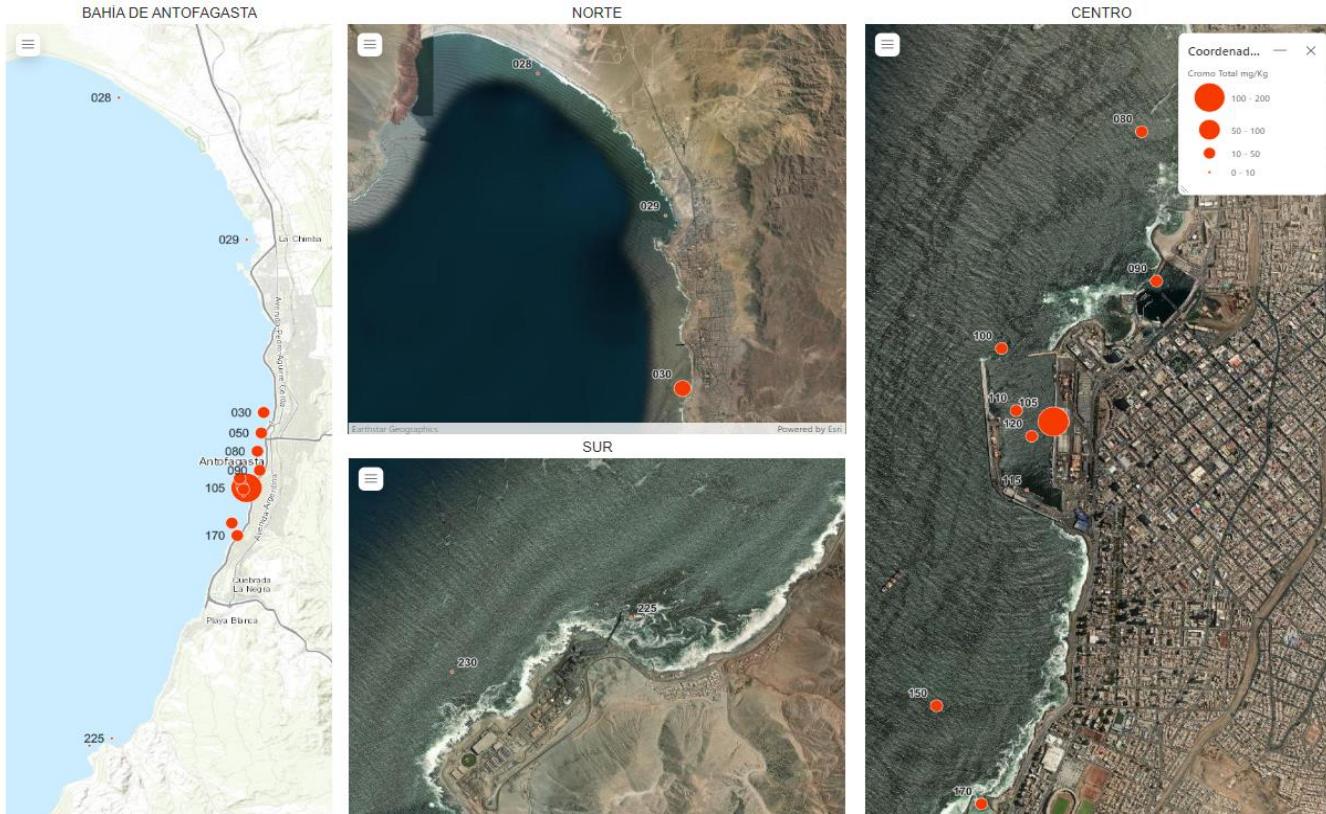
Figura 54: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cromo Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.



Fuente: WSP (2025)

Figura 55: Promedio de la concentración anual histórica del Cromo total en matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se presenta un mapa temático de la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del **Cromo total**, en las tres zonas definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 56: Promedio de la concentración histórica de Cromo Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=2,03$, $gl=2$, $p=0,36$). Por otro lado, si se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=50,08$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba *a posteriori* se observó que el periodo 1993-2001 (analizado por varios laboratorios), se diferenció estadísticamente tanto del periodo 2002-2017 (analizado por SGS), como del periodo 2019-2023 (analizado por ANAM) (Tabla 23).

Tabla 23: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Cromo total en la matriz de sedimento.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	<0,05	-
2019-2023	<0,05	0,41

Fuente: WSP (2025)

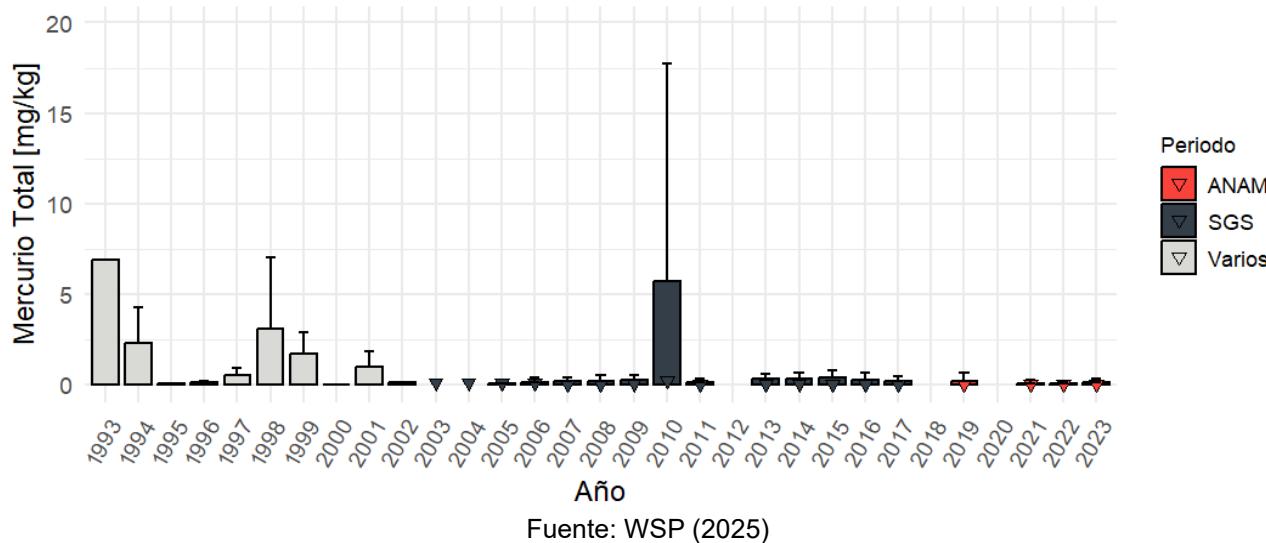
5.2.5 MERCURIO TOTAL

La Figura 57 y Figura 58 muestran las concentraciones de mercurio total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de este parámetro en el sedimento variaron entre 0,001 y 45,0 mg/kg. La mayor concentración se observó en la estación 090, en el sector centro, al norte del puerto de Antofagasta, durante el año 2010. Se observa superación del límite referencial de la OMI (2017) de efecto mínimo (0,14 mg/kg) y máximo (0,703 mg/kg). Este último es superado en gran parte del periodo analizado, principalmente en las estaciones ubicadas en la zona del puerto, observándose menores valores los últimos 3 años.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV
028																												0,0	0,0	0,0	0,0	
029																												0,0	0,0	0,0	0,0	
030																												0,4	0,0	7,0	1,1	
050																												1,2	0,0	15,7	3,1	
080																												1,0	0,0	11,0	2,1	
090																												1,3	0,0	45,0	6,3	
100																												5,2	3,5	6,9	1,7	
105																												0,0	0,0	0,0	0,0	
110																												0,6	0,0	7,0	1,2	
115																												0,0	0,0	0,1	0,0	
120																												0,4	0,1	1,1	0,4	
150																												0,4	0,0	2,0	0,5	
170																												0,2	0,0	1,2	0,3	
220																												0,0	0,0	0,1	0,0	
225																												0,0	0,0	0,1	0,0	
230																												0,0	0,0	0,1	0,0	
PROM	6,9	1,7	0,0	0,1	0,5	3,1	1,7	0,0	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	5,7	0,1	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,7	0,0	45,0	2,9	

Fuente: WSP (2025)

Figura 57: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Mercurio Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.



Fuente: WSP (2025)

Figura 58: Promedio de la concentración anual histórica del Mercurio total en matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se presenta un mapa temático de la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de

concentración histórica agregada del **Cadmio total**, en las tres zonas definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 59: Promedio de la concentración histórica de Mercurio Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=16,39$, $gl=2$, $p<0,05$). Al hacer una prueba *a posteriori*, se determinó que las diferencias significativas se encuentran entre los sectores Norte y Puerto, y los sectores Puerto y Sur (Tabla 24). De igual forma, al realizar la prueba no paramétrica entre períodos de tiempo, se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=37,40$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba *a posteriori* se observaron diferencias significativas entre todos los períodos analizados (Tabla 24).

Tabla 24: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Mercurio total en la matriz de sedimento.

	Sector		Periodo		
	Norte	Puerto		1993-2001	2002-2017
Puerto	<0,05	-	2002-2017	<0,05	-
Sur	1	<0,05	2019-2023	<0,05	<0,05

Fuente: WSP (2025)

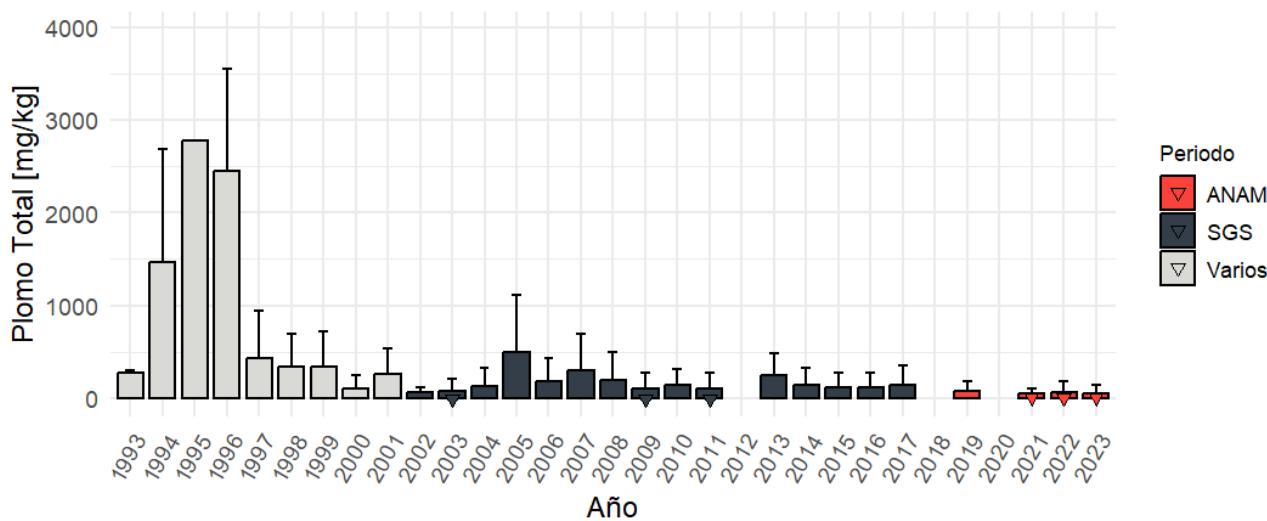
5.2.6 PLOMO TOTAL

La Figura 60 y Figura 61 muestran las concentraciones de plomo total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de este parámetro en el sedimento variaron entre 0,1 y 3.954 mg/kg, observándose una disminución en el tiempo. La mayor concentración se observó en la estación 090, en el sector centro, al norte del puerto de Antofagasta, durante el año 1996. Se observa superación del límite referencial de la OMI (2017) de efecto mínimo (30,2 mg/kg) y máximo (257,5 mg/kg). Este último es superado en gran parte del periodo analizado, principalmente en las estaciones ubicadas en el sector del puerto.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV																														
028																					21,5	9,9	2,1	3,2	5,4	0,6	0,6	2,1	6,7	0,6	42,0	11,3																														
029																												7,3	0,6	18,0	6,8																															
030																					62,5	126,1	65,6	0,1	203,0	11,8	12,9	25,2	29,7	23,7	11,9	14,0	12,7	39,9	14,1	30,5	20,5	20,1	21,1	14,5	22,7	0,6	0,6	36,3	0,1	285,7	51,4															
050	253,7	269,0																			80,6	228,0	66,9	30,4	76,5	100,6	19,0	48,0	62,2	21,4	16,7	24,9	29,8	50,6	264,6	523,0	43,5	35,9	20,3		123,8	0,3	1.202,0	224,0																		
080																				234,7	507,1	474,2	135,3	588,6	114,7	106,3	54,9	960,5	520,0	479,0	650,5	53,3	160,4	2,7	12,0	85,0	192,9	189,0		310,3	0,3	1.684,0	359,8																			
090																				2.691,0	2.772,5	2.190,3	928,7	1.013,6	586,7	356,0	580,3	51,0	290,0	549,0	683,5	450,0	552,0	612,5	356,5	322,5	209,0	395,0	528,5	245,0	273,7	565,5	260,4	104,7	83,1	35,3	737,8	33,3	3.954,0	870,1												
100																				295,8	1.454,0																			874,9	295,8	1.454,0	579,1																			
105																																							84,8	35,2	219,1	67,9																				
110																				1.230,8	436,7	707,1	207,0	299,7	144,9	125,5	186,0	931,5	201,9	990,0	39,2	262,3	382,0	193,7	307,0	347,5	403,0	244,9	326,8	35,3	119,6	0,6	261,3	370,1	0,6	1.516,0	363,6															
115																																							37,6	0,6	104,1	38,1																				
120																																							41,4	104,1	41,4	143,6	232,8	113,4	334,3	87,5																
150																				87,3	27,8	244,7	24,7	22,4	6,1	13,5	24,3	22,5	22,9	22,2	37,3	1,0	19,8	13,8	22,5	23,1	9,8	25,4											35,6	0,3	434,9	69,2										
170																				138,9	39,7	191,0	0,1	28,0	5,3	8,2	4,2	8,4	7,1	6,9	22,3	1,0	47,9	7,0	10,0	24,0	21,8	191,9	26,1										41,2	0,1	375,8	86,2										
220																																							7,1	8,1																			7,8	7,1	9,0	0,9
225																																							6,0	0,6	0,6	0,6	2,8	0,6	7,0	2,7																
230																																							20,5	0,6	0,6	2,3	8,9	0,6	38,9	15,0																
PROM	274,8	1.776,3	2.772,5	2.190,3	434,3	339,8	333,7	107,7	256,9	62,0	82,2	127,4	499,0	178,1	296,9	200,1	102,4	146,1	100,7	249,4	137,9	110,6	113,4	140,8	73,7	52,0	64,1	50,0	230,6	0,1	3.954,0	467,9																														

Fuente: WSP (2025)

Figura 60: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Plomo Total (mg/Kg) sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.



Fuente: WSP (2025)

Figura 61: Promedio de la concentración anual histórica del Plomo total en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se presenta un mapa temático de la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de

concentración histórica agregada del **Plomo total**, en las tres zonas definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 62: Promedio de la concentración histórica de Plomo Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.

Ánálisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, se observaron diferencias significativas entre los sectores desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=32,74$, $gl=2$, $p<0,05$). Al hacer una prueba *a posteriori*, se determinó que las diferencias significativas se encuentran entre los sectores Norte y Puerto, y Puerto y Sur (Tabla 25).

De igual forma, al realizar la prueba no paramétrica entre períodos de tiempo, se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=35,05$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba *a posteriori* se observaron diferencias significativas entre todos los períodos analizados (Tabla 25).

Tabla 25: Prueba *a posteriori* de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Plomo total en la matriz de sedimento.

	Sector			Periodo	
	Norte	Puerto		1993-2001	2002-2017
Puerto	<0,05	-	2002-2017	<0,05	-
Sur	1	<0,05	2019-2023	<0,05	<0,05

Fuente: WSP (2025)

5.2.7 ZINC TOTAL

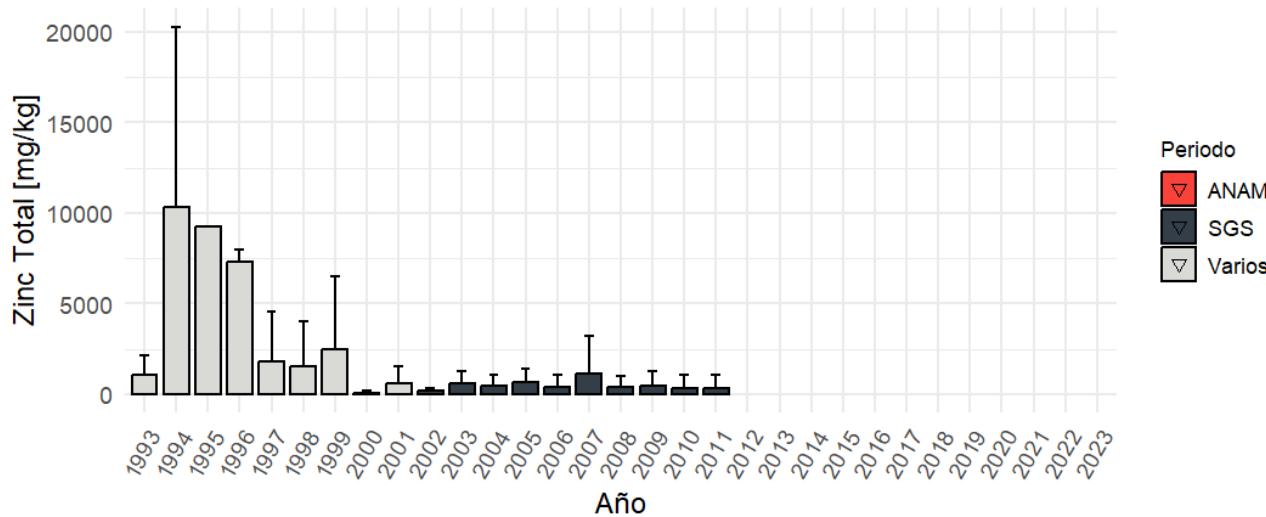
La Figura 63 y Figura 64 muestran las concentraciones de Zinc total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existe un periodo sin información entre el año 2012 y el año 2023. Las concentraciones históricas en el sedimento del periodo que si fue monitoreado variaron entre 0,2 y 32.018 mg/kg, observándose una disminución en el tiempo.

La mayor concentración se observó en la estación 090, en el sector centro, al norte del puerto de Antofagasta, durante el año 1994. Se observa superación del límite referencial de la OMI (2017) de efecto mínimo (124 mg/kg) y máximo (410 mg/kg). Este último es superado en gran parte del periodo analizado, excepto en el año 2000.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	PROM	MIN	MAX	DESV
030					127,4	242,8	158,3	138,5	251,3	65,8	47,4	107,0	66,9	59,4	58,9	30,5	41,1	66,6	36,6	100,8	11,5	431,0	96,1
050	300,4	380,0			79,1	391,9	197,9	58,9	84,3	144,7	93,5	184,0	378,4	51,7	18,5	47,6	92,8	47,0	1.313,3	226,1	0,2	2.618,0	470,5
080					185,3	530,8	627,7	62,8	261,6	233,8	786,0	53,4	868,0	364,0	320,0	416,5	81,3	169,0	21,4	347,3	12,6	1.164,0	303,2
090	20.146,0	9.220,5	7.451,3	3.694,2	6.832,0	4.667,8	151,9	2.312,9	152,0	1.729,5	1.665,0	1.581,5	1.348,0	1.742,5	1.724,0	1.913,0	609,0	358,5	3.899,6	43,8	32.018,0	5.839,5	
100	1.821,0	10.492,0																		6.156,5	1.821,0	10.492,0	4.335,5
110					6.277,4	2.649,6	2.070,8	144,3	1.219,7	458,0	1.279,0	993,0	1.439,0	1.011,8	5.681,5	282,6	997,9	1.530,0	638,3	1.805,3	43,5	8.296,8	2.011,3
150					288,3	53,0	6.422,8	61,0	40,9	33,6	48,3	75,9	43,9	53,6	43,7	81,5	23,3	23,3	31,6	502,5	8,1	12.737,4	2.313,5
170					316,3	113,0	3.150,3	28,1	33,1	39,8	37,9	31,2	132,1	29,1	22,6	52,1	37,0	23,4	16,6	279,1	7,0	6.105,0	1.106,3
PROM	1.060,7	12.791,0	9.220,5	7.451,3	1.806,0	1.544,7	2.470,8	92,2	600,5	161,1	574,5	444,2	688,6	416,8	1.126,8	376,4	455,2	352,6	345,2	1.170,8	0,2	32.018,0	3.098,7

Fuente: WSP (2025)

Figura 63: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Zinc Total (mg/Kg) en sedimento de la Bahía de Antofagasta. Gradiente de efecto mínimo (amarillo) a máximo (rojo) de la norma.

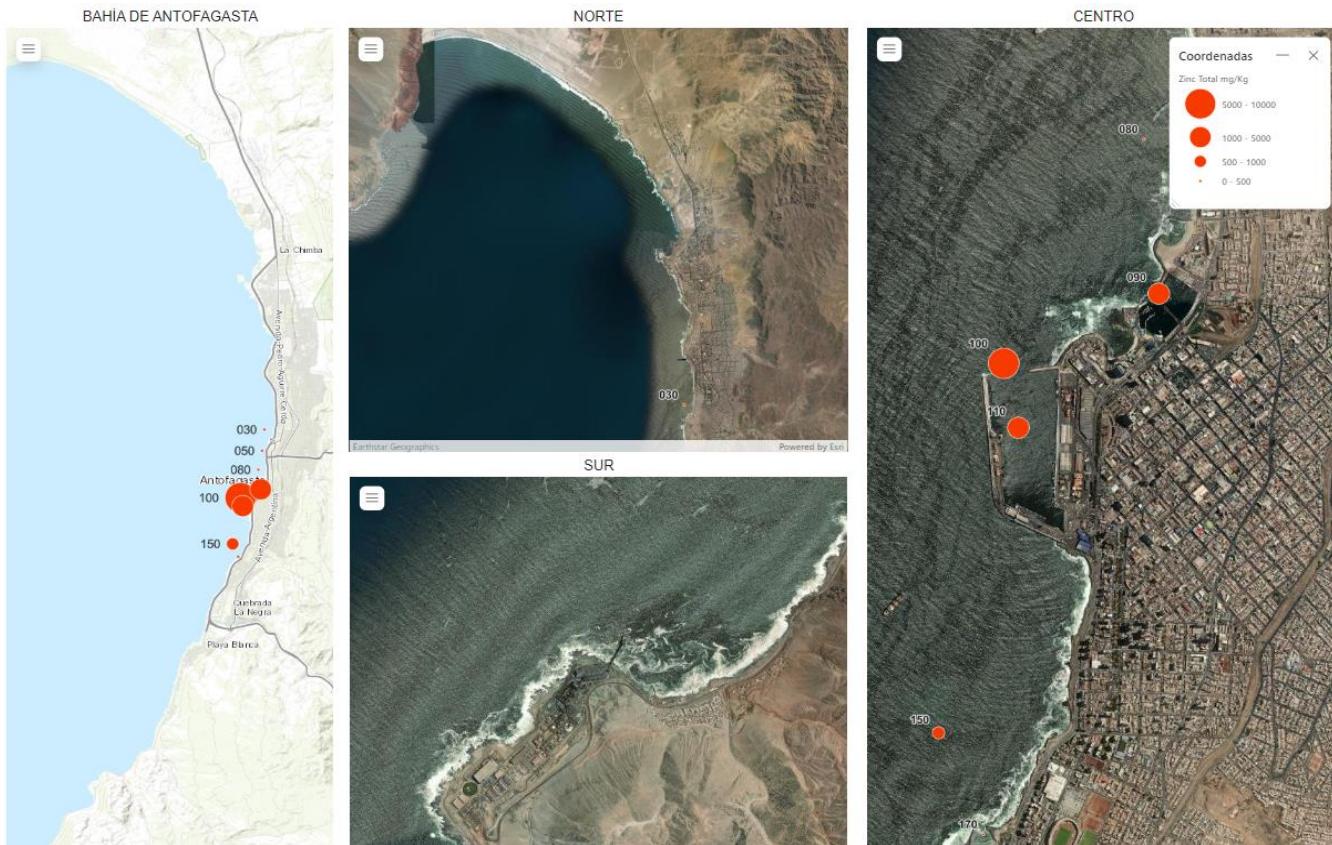


Fuente: WSP (2025)

Figura 64: Promedio de la concentración anual histórica del Zinc total en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración

histórica agregada del parámetro **Zinc Total** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 65: Promedio de la concentración histórica de Zinc Total por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Dada la información disponible, no fue posible realizar análisis estadísticos entre sectores. Al realizar la prueba no paramétrica entre períodos de tiempo, si se observaron diferencias significativas (Kruskal Wallis, $H=12,82$ $gl=1$ $p<0,05$) entre el periodo 1993-2001 (analizado por varios laboratorios) y el periodo 2002-2011 (analizado por SGS) (Tabla 26).

Tabla 26: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Zinc total en la matriz de sedimento. s/d = sin dato.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	<0,05	-
2019-2023	s/d	s/d

Fuente: WSP (2025)

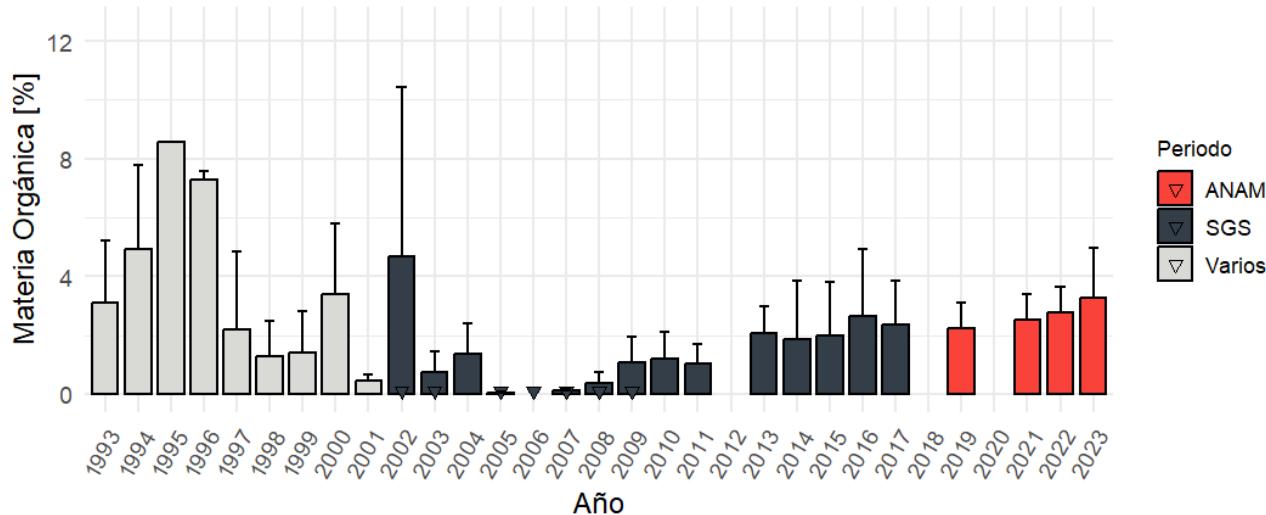
5.2.8 MATERIA ORGNÁNICA

La Figura 66 y Figura 67 muestran los porcentajes históricos de materia orgánica (%) desde 1993 hasta 2023. Los porcentajes de este parámetro en el sedimento variaron entre 0 y 31,9 %. El mayor porcentaje se observó en la estación 110, en el sector centro, en la zona del puerto, durante el año 2002. Respecto del límite de referencia establecido en la Res. Ex. N°3612/2009 y sus modificaciones, de <9%, este fue superado principalmente en dicho año.

Estación	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	2019	2021	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV							
028																											1,6	1,5	1,1	1,1	1,3	1,6	1,4	1,8	1,4	0,9	2,0	0,3		
029																																	2,6	1,1	5,4	1,5				
030																																	1,5	0,1	10,9	1,8				
050	4,6	1,9																															1,6	0,1	8,4	2,0				
080																																		1,0	0,1	3,5	0,9			
090	5,4	8,6	7,4	1,3	1,4	1,9	3,9	0,6	0,1	1,0	1,8	0,1	0,1	0,1	0,6	1,2	1,3	1,7	0,8	1,9	1,2	5,5	3,4	2,2	4,2	2,4	2,7	2,4	0,1	9,4	2,6									
100	1,6	7,5																															4,6	1,6	7,5	3,0				
105																																	3,0	2,2	3,7	0,5				
110																																	3,2	0,1	31,9	5,0				
115																																	2,0	3,3	3,2	5,7	3,3	1,6	5,7	1,4
120																																	2,6	1,9	2,8	5,8	3,1	1,7	5,8	1,5
150																																	1,2	0,0	8,1	1,7				
170																																	1,0	0,1	3,9	1,1				
220																																	1,0	0,8	1,3	0,2				
225																																	1,2	1,8	2,9	1,4	1,7	1,1	2,9	0,6
230																																	3,0	2,7	2,8	2,8	2,8	2,1	3,8	0,6
PROM	3,1	5,1	8,6	7,4	2,2	1,3	1,4	3,4	0,5	4,7	0,7	1,3	0,1	0,1	0,1	0,4	1,1	1,2	1,0	2,1	1,9	2,0	1,2	2,7	2,4	2,2	2,5	2,8	3,3	1,8	0,0	31,9	2,6							

Fuente: WSP (2025)

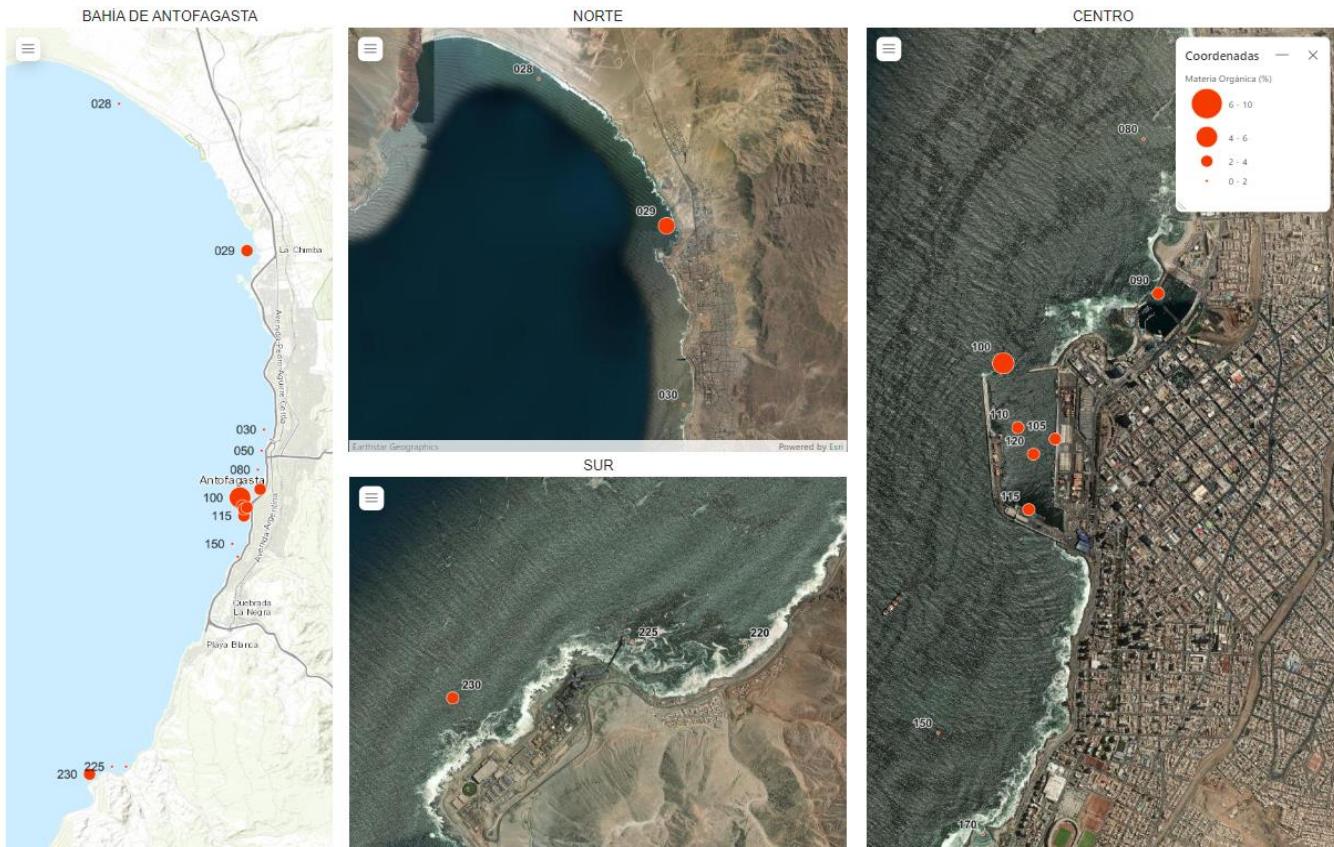
Figura 66: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Materia Orgánica (%) en sedimento de la Bahía de Antofagasta.



Fuente: WSP (2025)

Figura 67: Promedio del porcentaje (%) anual histórico de la Materia Orgánica en la matriz de sedimento de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Materia Orgánica** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 68: Promedio de la concentración histórica de Materia Orgánica por estación en sedimento de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, se observaron diferencias significativas entre los sectores monitoreados dentro de la bahía desde el año 2016 (Kruskal Wallis, $H=15,39$, $gl=2$, $p<0,05$). Al hacer una prueba *a posteriori*, se determinó que las diferencias significativas se encuentran entre los sectores Norte y Puerto (Tabla 27).

De igual forma, al realizar la prueba no paramétrica entre períodos de tiempo, se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=53,75$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba *a posteriori* se observaron diferencias significativas entre todos los períodos analizados (Tabla 27).

Tabla 27: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Materia Orgánica en la matriz de sedimento.

	Sector		Periodo	
	Norte	Puerto	1993-2001	2002-2017
Puerto	<0,05	-	2002-2017	<0,05
Sur	0,90	0,07	2019-2023	<0,05

Fuente: WSP (2025)

5.3 MATRIZ BIOLÓGICA

A continuación, se presenta el análisis de los parámetros de la matriz de biota. Dada la carencia de una Norma Secundaria para el sector, los resultados son comparados con el Criterio de Protección Ecológica de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos (NJDEP), 2009. Además, a modo referencial se comparan algunos metales con el estudio de Ahumada (2006) y sus colaboradores sobre el chorito chileno (*Mytilus chilensis*) de la zona de los fiordos y canales de la X y XI Regiones (Tabla 28).

Tabla 28: Normas de referencia para la matriz biológica.

Parámetro	Unidad	NJDEP, 2009	Ahumada <i>et al.</i> 2006
Arsénico total	mg/kg	9,9	---
Cadmio total	mg/kg	4	0,9
Cobre total	mg/kg	5,7	5,7
Cromo total	mg/kg	0,4	---
Mercurio total	mg/kg	0,1	---
Plomo total	mg/kg	0,0537	0,7
Zinc total	mg/kg	6,62	83,1

Fuente: WSP (2025) en base a NJDEP (2009) y Ahumada *et al.* 2006

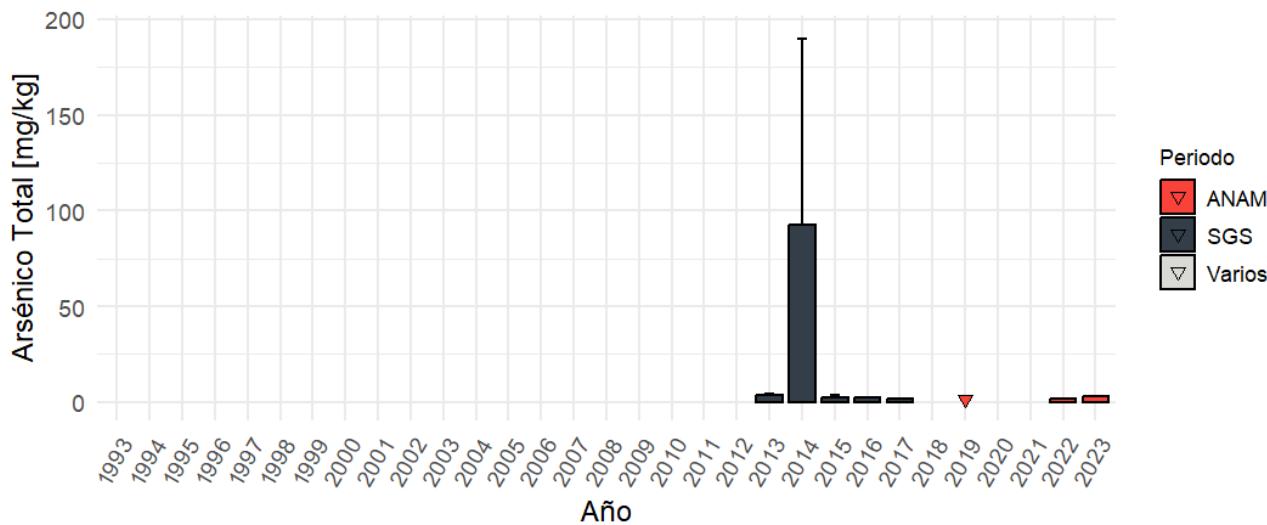
5.3.1 ARSÉNICO TOTAL

La Figura 69 y Figura 70 muestran las concentraciones de arsénico total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existe un periodo sin información entre el año 1993 y el año 2012. Las concentraciones históricas para la matriz biota del periodo que si fue monitoreado variaron entre <0,8 y 184 mg/kg. La mayor concentración se observó en la estación 001, en el sector Norte de la bahía, durante el año 2014. Se observa una superación del valor límite establecido por la NJDEP (2009) de 9,9 mg/kg sólo durante el año 2014.

Estación	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV
001	2,9	93,8	2,4						39,0	1,3	184,0	72,5
020	2,6	90,3	2,1	2,4					27,5	1,4	177,0	61,1
120						0,8			0,8	0,8	0,8	0,0
140	4,8	93,3	3,8	2,4	1,8				23,0	1,5	183,0	56,6
225						0,8	2,0	3,0	1,9	0,8	3,0	0,9
PROM	3,4	92,5	2,8	2,4	1,8	0,8	2,0	3,0	24,1	0,8	184,0	58,1

Fuente: WSP (2025)

Figura 69: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Arsénico Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 70: Promedio de la concentración anual histórica de Arsénico total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración

histórica agregada del parámetro **Arsénico Total** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 71: Promedio de la concentración histórica de Arsénico por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Dada la cantidad de información levantada en la matriz de biota, no fue posible realizar análisis estadísticos entre sectores. Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, se observaron diferencias significativas (Kruskal Wallis, $H=4,01$ $gl=2$, $p<0,05$) entre el periodo 2013-2017 (analizado por SGS) y 2019-2023 (analizado por ANAM) (Tabla 29).

Tabla 29: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Arsénico total en la matriz de Biota.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	s/d	-
2019-2023	s/d	<0,05

Fuente: WSP (2025)

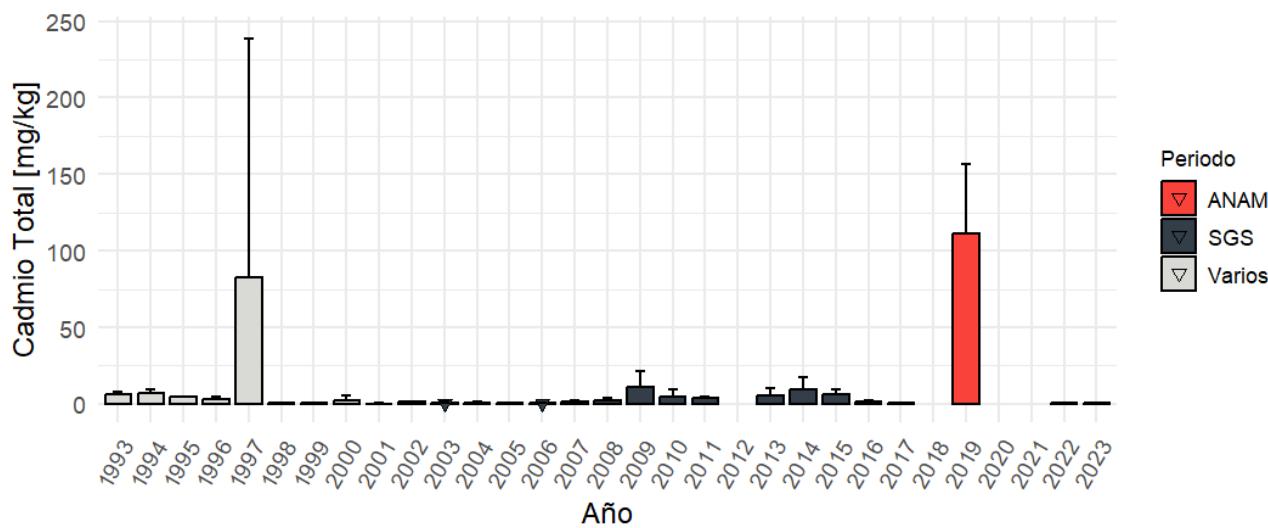
5.3.2 CADMIO TOTAL

La Figura 72 y Figura 73 muestran las concentraciones de cadmio total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de este parámetro en la matriz biota varían entre 0 y 317,0 mg/kg. La mayor concentración se observa en la estación 140, en el sector centro, al sur del puerto, durante el año 1997. Se observa una superación del valor límite establecido por la NJDEP (2009) de 4 mg/kg durante gran parte del periodo analizado. Lo mismo sucede con el límite establecido por Ahumada (2006) de 0,9 mg/kg, el cuál es más conservador.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV		
001																				2,0	6,5	6,2					5,7	0,0	15,8	5,1			
020						4,5	1,0	0,7	3,0	0,3	1,2	0,7						0,6	0,3	1,9	2,3	13,9	4,6	3,2	2,4	6,5	5,7	1,2		3,1	0,0	24,5	4,8
070																												4,3	4,3	4,3	0,0		
120																												79,1	79,1	79,1	0,0		
140	5,2	6,0	4,5		160,7	0,5	0,7	1,5	0,3	1,2	0,6	0,8	0,8	0,3	1,6	2,2	8,1	5,0	4,5	11,2	7,1	7,7	1,4	0,9			10,5	0,0	317,0	47,5			
190	7,5	6,5	4,5	3,3																								5,1	2,5	10,3	2,3		
225																												143,2	0,4	143,2	67,2		
PROM	6,4	6,3	4,5	3,3	82,6	0,8	0,7	2,2	0,3	1,2	0,7	0,8	0,8	0,7	0,3	1,7	2,3	11,0	4,8	3,8	5,2	6,7	6,5	1,3	0,9	111,1	0,4	0,8	8,9	0,0	317,0	35,3	

Fuente: WSP (2025)

Figura 72: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cadmio Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 73: Promedio de la concentración anual histórica de Cadmio total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Cadmio Total** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 74: Promedio de la concentración histórica de Cadmio Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Dada la cantidad de información levantada en la matriz de biota, no fue posible realizar análisis estadísticos entre sectores. Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los distintos períodos analizados (Kruskal Wallis, $H=0,52$, $gl=2$, $p=0,77$).

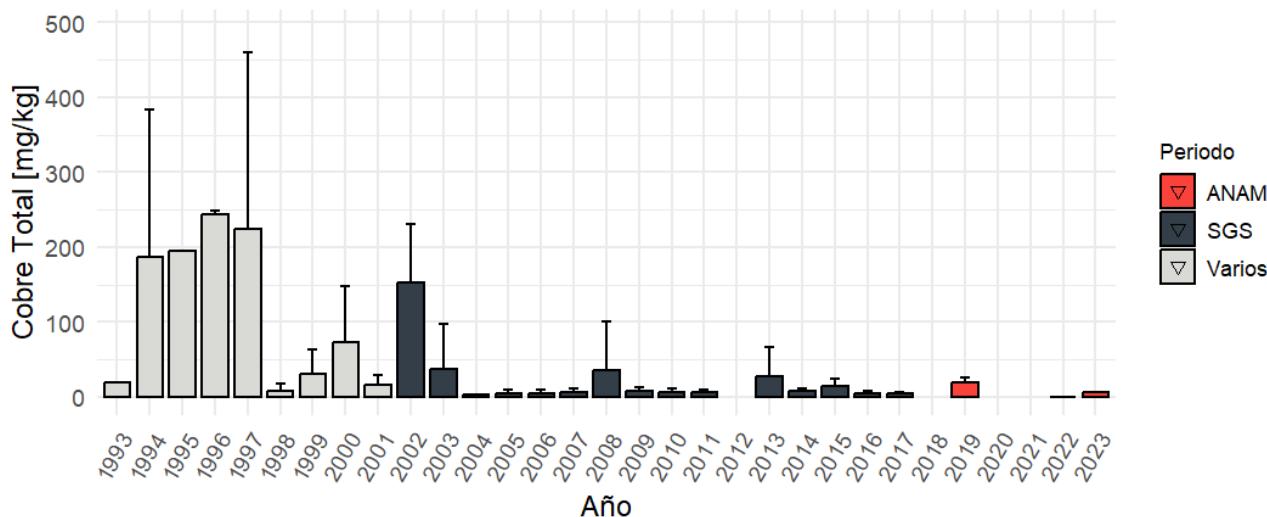
5.3.3 COBRE TOTAL

La Figura 75 y Figura 76 muestran las concentraciones de cobre total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de este parámetro en la matriz biota varían entre 0 y 526 mg/kg. La mayor concentración se observa en la estación 020, en el sector centro, al norte del puerto, durante el año 1997. Se observa una superación del valor límite establecido por la NJDEP (2009) de 5,7 mg/kg durante gran parte del periodo analizado, exceptuando los años 2004, 2017 y 2022.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV									
001																				6,2	9,0	13,0					9,9	3,1	21,5	6,3										
020						423,6	5,3	52,9	87,6	27,5	208,0	69,1				7,6	8,1	10,2	68,1	8,5	9,2	6,9	5,6	9,3	14,0	4,6		58,4	1,8	481,7	107,7									
070																				2,5								2,5	2,5	2,5	0,0									
120																				2,5																				
140	18,8	157,9	194,9														25,2	11,0	7,0	59,2	3,7	96,9	5,2	3,0	1,9	2,2	3,6	3,6	8,2	2,1	9,7	71,6	6,7	16,4	4,6	5,0	31,2	1,0	372,0	74,7
190	19,0	281,1	194,9	241,7																	23,6								219,7	17,8	526,0	176,6								
225																				13,4	0,0	6,4	6,6	0,0	13,4	5,5														
PROM	18,9	231,8	194,9	241,7	224,4	8,1	30,0	73,4	15,6	152,4	37,2	3,0	4,8	5,2	6,9	35,8	8,4	5,7	6,5	27,9	8,3	14,5	4,6	5,0	5,0	18,5	0,0	6,4	55,8	0,0	526,0	111,5								

Fuente: WSP (2025)

Figura 75: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cobre Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 76: Promedio de la concentración anual histórica de Cobre total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Cobre Total** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 77: Promedio de la concentración histórica de Cobre Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Dada la cantidad de información levantada en la matriz de biota, no fue posible realizar análisis estadísticos entre sectores. Al realizar la prueba no paramétrica entre períodos de tiempo, se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=19,38$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba a posteriori se observaron diferencias significativas entre el periodo 1993-2001 (analizado por varios laboratorios) y el periodo 2002-2017 (analizado por SGS) (Tabla 30).

Tabla 30: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Cobre total en la matriz de Biota.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	<0,05	-
2019-2023	0,32	1

Fuente: WSP (2025)

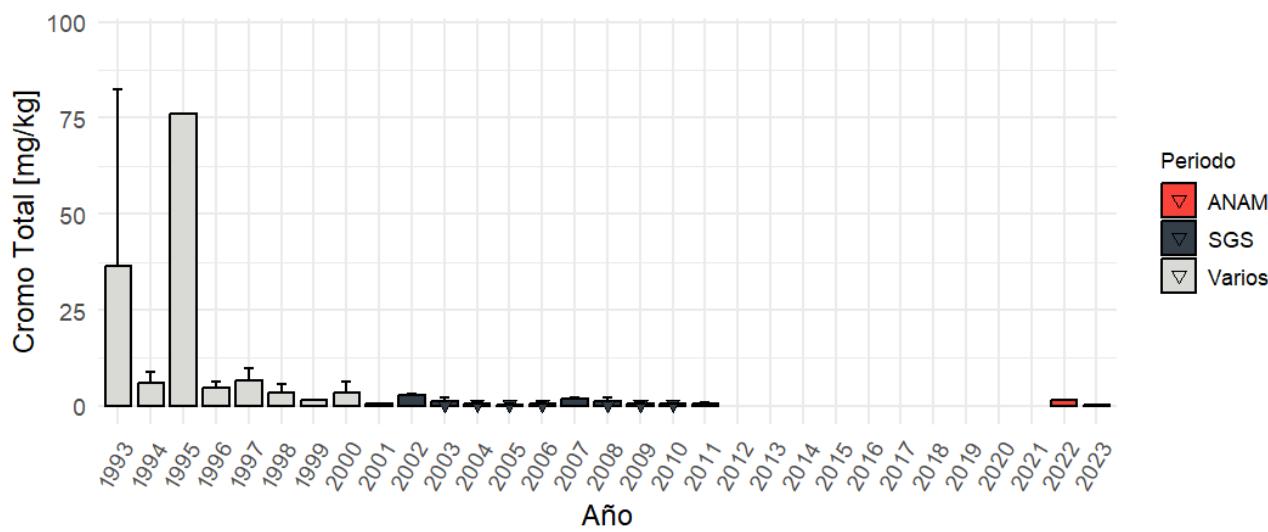
5.3.4 CROMO TOTAL

La Figura 78 y Figura 79 muestran las concentraciones de cromo total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existe un periodo sin información entre el año 2012 y el año 2018. Las concentraciones históricas en la matriz biota del periodo que si fue monitoreado varían entre 0,1 y 148 mg/kg. La mayor concentración se observa tanto en la estación 140 como en la 190, ambas en el sector centro, al sur del puerto, durante el año 1995. Se observa una superación del valor límite establecido por la NJDEP (2009) de 0,4 mg/kg durante todo el periodo analizado, exceptuando el año 2023.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2023	PROM	MIN	MAX	DESV
001																									
020						7,1	4,4	1,7	2,5	0,5	2,6	1,2		0,4	0,8	1,6	1,7	0,8	0,4	0,8		1,9	0,1	10,7	2,3
070																						0,5	0,5	0,5	0,0
140	69,0	7,1	76,2			5,9	2,7	1,7	4,1	0,5	3,0	1,2	0,5	0,3	0,5	2,1	0,6	0,5	0,5	0,5		8,5	0,3	148,0	27,3
190	4,1	5,6	76,2	4,5																		20,7	3,1	148,0	45,0
225																					1,5	0,3	0,9	0,3	0,6
PROM	36,6	6,2	76,2	4,5	6,5	3,5	1,7	3,3	0,5	2,8	1,2	0,5	0,3	0,7	1,9	1,2	0,7	0,5	0,6	1,5	0,3	7,2	0,1	148,0	25,2

Fuente: WSP (2025)

Figura 78: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Cromo Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 79: Promedio de la concentración anual histórica de Cromo total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Cromo Total** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 80: Promedio de la concentración histórica de Cromo Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Dada la cantidad de información levantada en la matriz de biota, no fue posible realizar análisis estadísticos entre sectores. Al realizar la prueba no paramétrica entre períodos de tiempo, se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=23,33$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba a posteriori se observaron diferencias significativas entre el período 1993-2001 (analizado por varios laboratorios) y el período 2002-2017 (analizado por SGS) (Tabla 31).

Tabla 31: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Cromo total en la matriz de Biota.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	<0,05	-
2019-2023	0,32	1

Fuente: WSP (2025)

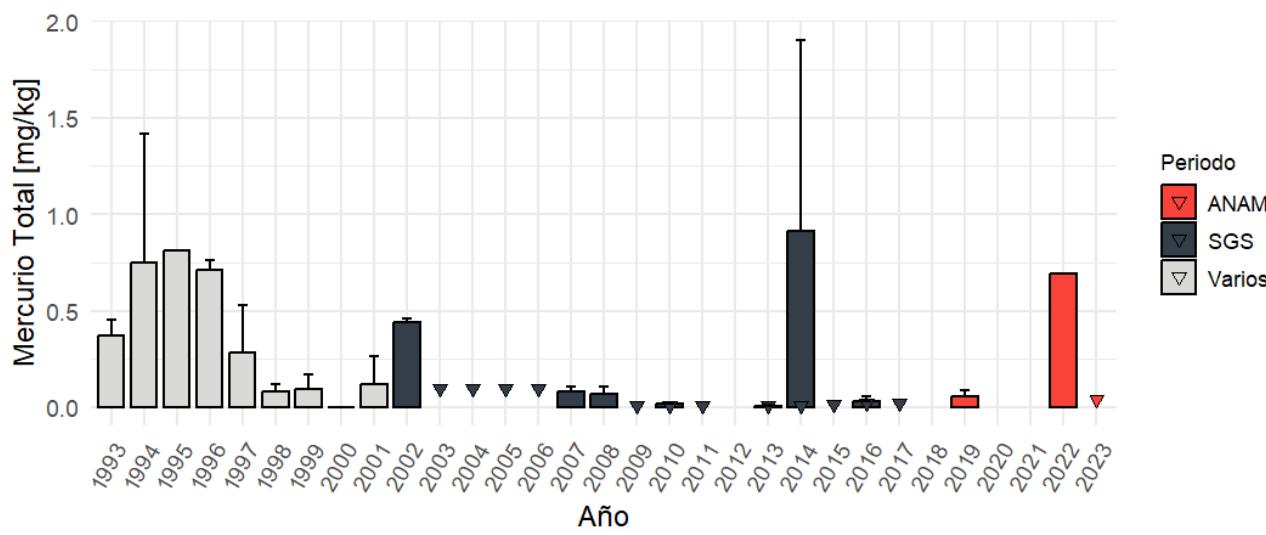
5.3.5 MERCURIO TOTAL

La Figura 81 y Figura 82 muestran las concentraciones de mercurio total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de este parámetro en la matriz biota varían entre 0 y 3,7 mg/kg. La mayor concentración se observa el 2014 tanto en la estación 020 como en la 140, ambas en el sector centro, la primera al norte del puerto y la segunda al sur de este. Se observa una superación del valor límite establecido por la NJDEP (2009) de 0,1 mg/kg durante gran parte del periodo comprendido entre 1993 y 2002. Luego sólo es superado los años 2014 y 2022.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV		
001																				0,01	1,18	0,01						0,59	0,01	3,50	1,30		
020						0,26	0,09	0,15	0,00	0,16	0,46	0,05			0,05	0,05	0,10	0,07	0,01	0,03	0,01	0,01	1,23	0,01	0,03					0,19	0,00	3,68	0,62
070																				0,01								0,01	0,01	0,01	0,00		
120																												0,08	0,08	0,08	0,00		
140	0,31	0,72	0,81			0,31	0,07	0,03	0,00	0,07	0,43	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01	1,23	0,01	0,03	0,01		0,22	0,00	3,68	0,62			
190	0,43	1,02	0,81	0,72																								0,81	0,02	1,90	0,60		
225																												0,03	0,69	0,02	0,25		
PROM	0,37	0,90	0,81	0,72	0,28	0,08	0,09	0,00	0,12	0,44	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,07	0,01	0,02	0,01	0,01	1,21	0,01	0,03	0,01	0,05	0,69	0,02	0,28	0,00	3,68	0,69	

Fuente: WSP (2025)

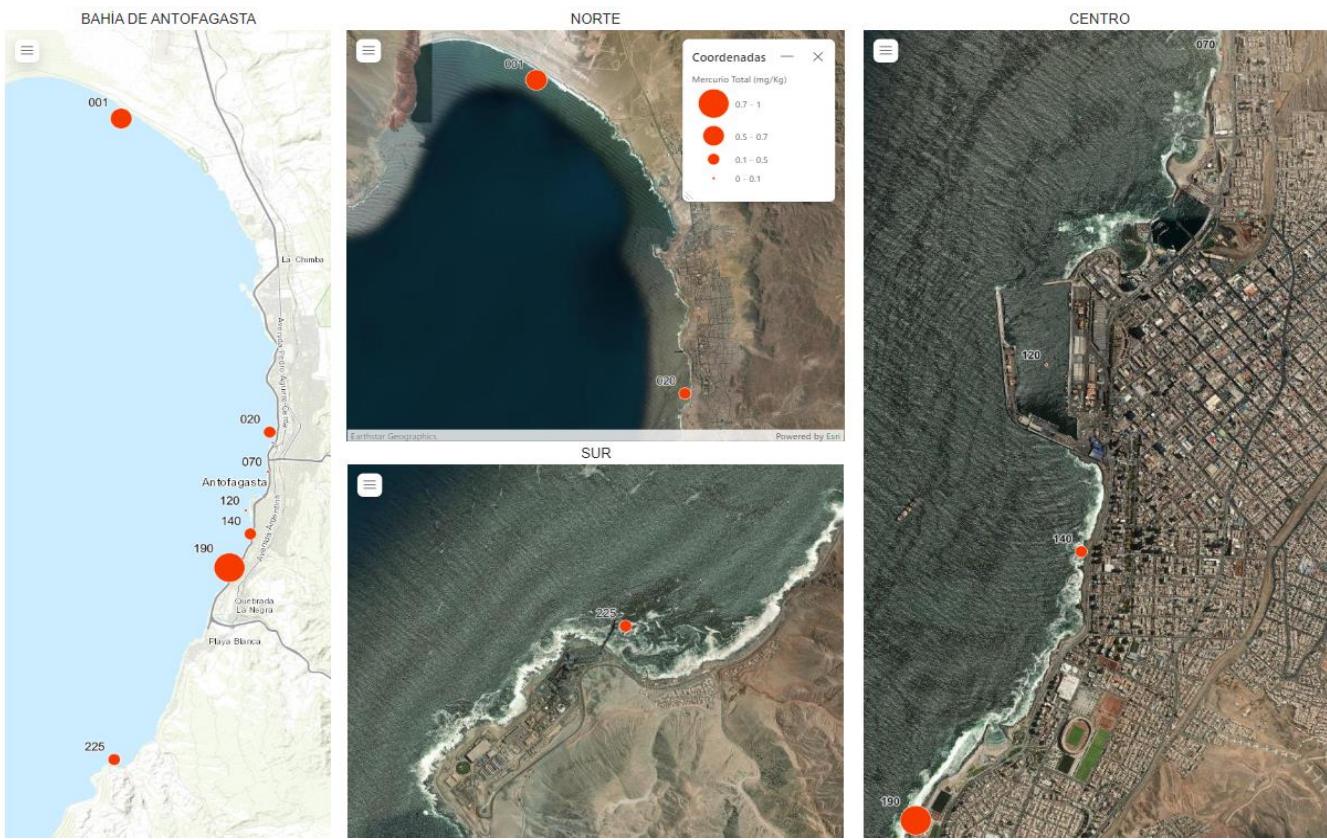
Figura 81: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Mercurio Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 82: Promedio de la concentración anual histórica de Mercurio total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Mercurio Total** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 83: Promedio de la concentración histórica de Mercurio Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Dada la cantidad de información levantada en la matriz de biota, no fue posible realizar análisis estadísticos entre sectores. Al realizar la prueba no paramétrica entre períodos de tiempo, se observaron diferencias significativas en los distintos períodos muestreados (Kruskal Wallis, $H=10,08$, $gl=2$, $p<0,05$). Al realizar una prueba a posteriori se observaron diferencias significativas entre el periodo 1993-2001 (analizado por varios laboratorios) y el periodo 2002-2017 (analizado por SGS) (Tabla 32).

Tabla 32: Prueba a posteriori de “Dunn” con corrección de Bonferroni para Mercurio total en la matriz de Biota.

Periodo		
	1993-2001	2002-2017
2002-2017	<0,05	-
2019-2023	1	0,78

Fuente: WSP (2025)

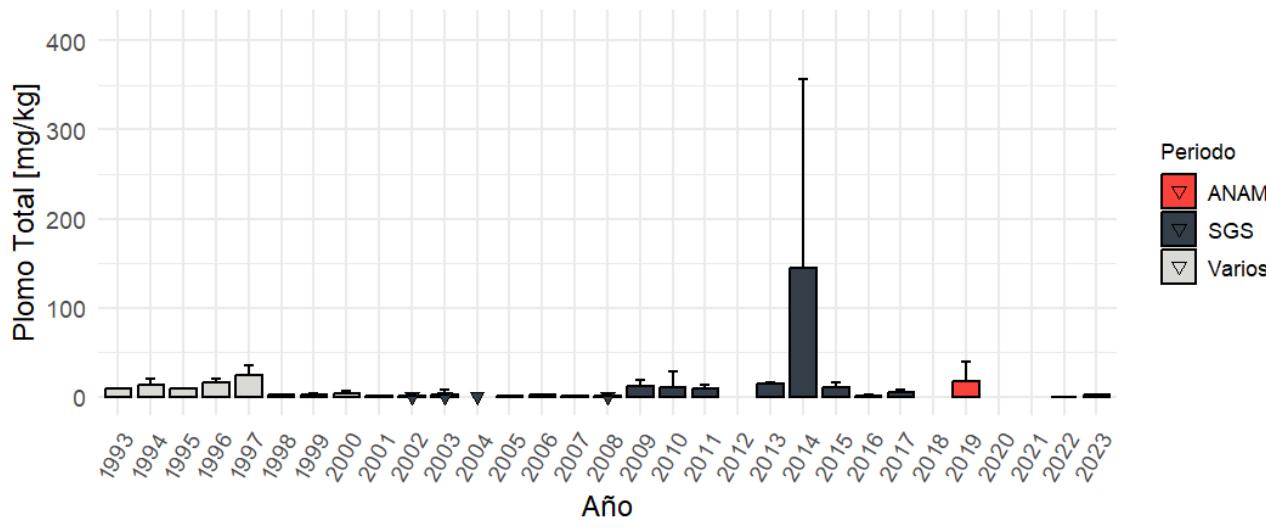
5.3.6 PLOMO TOTAL

La Figura 84 y Figura 85 muestran las concentraciones de plomo total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. Las concentraciones históricas de este parámetro en la matriz biota varían entre 0,1 y 419,0 mg/kg. La mayor concentración se observa en la estación 001, en el sector norte de la bahía, durante el año 2014. Se observa una superación del valor límite establecido por la NJDEP (2009) de 0,0537 mg/kg durante todo el periodo analizado. Para el caso del límite establecido por Ahumada (2006) de 0,7 mg/kg, también es sobrepasado en algunas estaciones en gran parte del periodo, excepto los años 2004, 2005 y 2022.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2022	2023	PROM	MIN	MAX	DESV			
001																				16,0	145,2	9,7					78,5	3,6	419,0	152,3				
020																				30,7	2,5	3,3	1,8	0,8	1,8	5,4	6,8	0,2	39,4	9,2				
070																				0,7	2,4	1,6	1,8	7,5	20,9	10,8	15,4	7,0	8,0	1,1				
120																				2,5							2,5	2,5	2,5	0,0				
140																				9,1	13,4	9,8					32,9	32,9	32,9	0,0				
190																				18,2	1,3	2,6	6,6	1,1	0,3	0,4	0,3	0,4	1,4	0,5				
225																				1,1	17,9	1,7	12,3	14,1	145,5	14,5	1,2	5,5		15,5	0,2	418,0	62,4	
PROM	9,3	14,9	9,8	14,4	24,4	1,9	3,0	4,2	0,9	1,0	2,9	0,3	0,5	1,9	1,1	1,4	12,7	11,3	9,1	15,2	99,2	10,8	1,1	5,5	17,2	0,1	2,7	1,5	0,1	2,7	15,7	0,1	419,0	58,7

Fuente: WSP (2025)

Figura 84: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Plomo Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta. Color rojo indica valores sobre la norma de referencia.



Fuente: WSP (2025)

Figura 85: Promedio de la concentración anual histórica de Plomo total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Plomo Total** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.



Fuente: WSP (2025)

Figura 86: Promedio de la concentración histórica de Plomo Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.

Análisis Estadísticos

Dada la cantidad de información levantada en la matriz de biota, no fue posible realizar análisis estadísticos entre sectores. Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los distintos periodos analizados (Kruskal Wallis, $H=1,75$ gl=2, $p=0,42$).

5.3.7 ZINC TOTAL

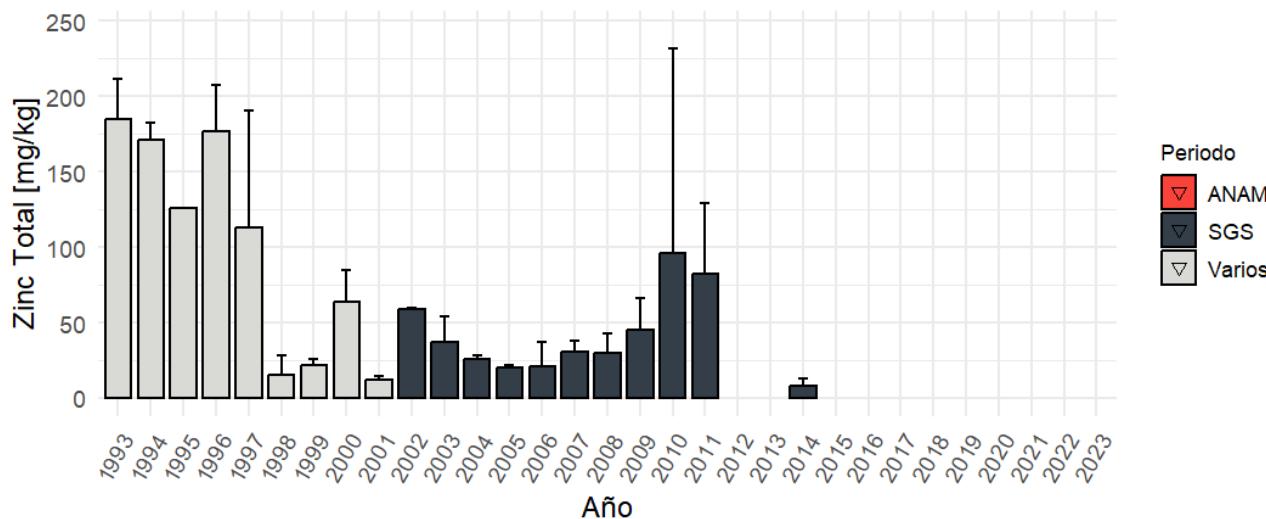
La Figura 87 y Figura 88 muestran las concentraciones de Zinc total en mg/kg desde 1993 hasta 2023. En ellas se puede observar que existen periodos sin información entre los años 2012-2013 y los años 2015-2023. Las concentraciones históricas en la matriz biota del periodo que si fue monitoreado varían entre 2,3 y 298,0 mg/kg.

La mayor concentración se observa en la estación 020, en el sector centro, al norte del puerto, durante el año 2010. Se observa una superación del valor límite establecido por la NJDEP (2009) de 6,62 mg/kg durante todo el periodo analizado. Mientras que el límite establecido por Ahumada (2006) de 83,1 mg/kg, no es sobrepasado en ninguna estación entre los años 1998 y 2009, además del año 2014.

Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2014	PROM	MIN	MAX	DESV	
001																				10,8	10,8	10,8	10,8	0,0	
020					157,5	17,4	24,4	51,3	10,9	58,0	40,1							21,2	25,2	35,7	29,1	28,4	162,0	84,4	10,1
070																					38,8	38,8	38,8	38,8	0,0
140	204,0	176,0	126,3			68,7	13,9	19,0	77,0	13,8	59,4	34,8	25,5	18,8	16,4	24,8	30,1	62,7	29,8	121,0	2,3	55,8	2,3	204,0	55,3
190	166,0	169,0	126,3	184,0																	164,2	99,5	263,0	41,4	
PROM	185,0	171,8	126,3	184,0	113,1	15,6	21,7	64,1	12,3	58,7	37,4	25,5	20,0	20,8	30,3	29,6	45,5	95,9	82,2	7,8	67,0	2,3	298,0	67,3	

Fuente: WSP (2025)

Figura 87: Matriz de concentración anual histórica y estadística básica por estación de monitoreo de Zinc Total (mg/Kg) en la matriz de Biota de la Bahía de Antofagasta.



Fuente: WSP (2025)

Figura 88: Promedio de la concentración anual histórica de Zinc total en la matriz de biota de la Bahía de Antofagasta. Triángulos invertidos indican valores bajo límite de detección.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el rango de concentración histórica agregada del parámetro **Zinc Total** subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis.

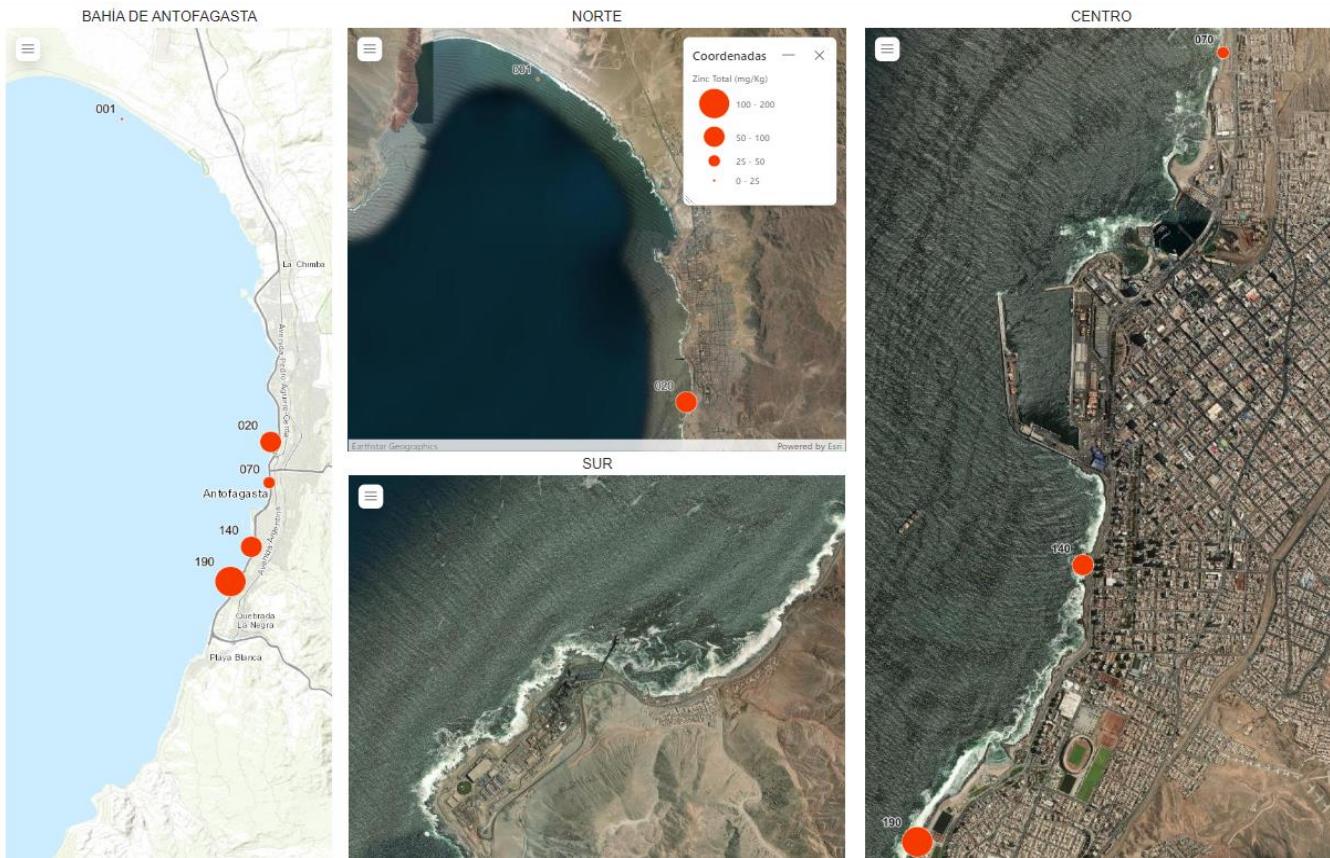


Figura 89: Promedio de la concentración histórica de Zinc Total por estación en matriz biota de la Bahía de Antofagasta.

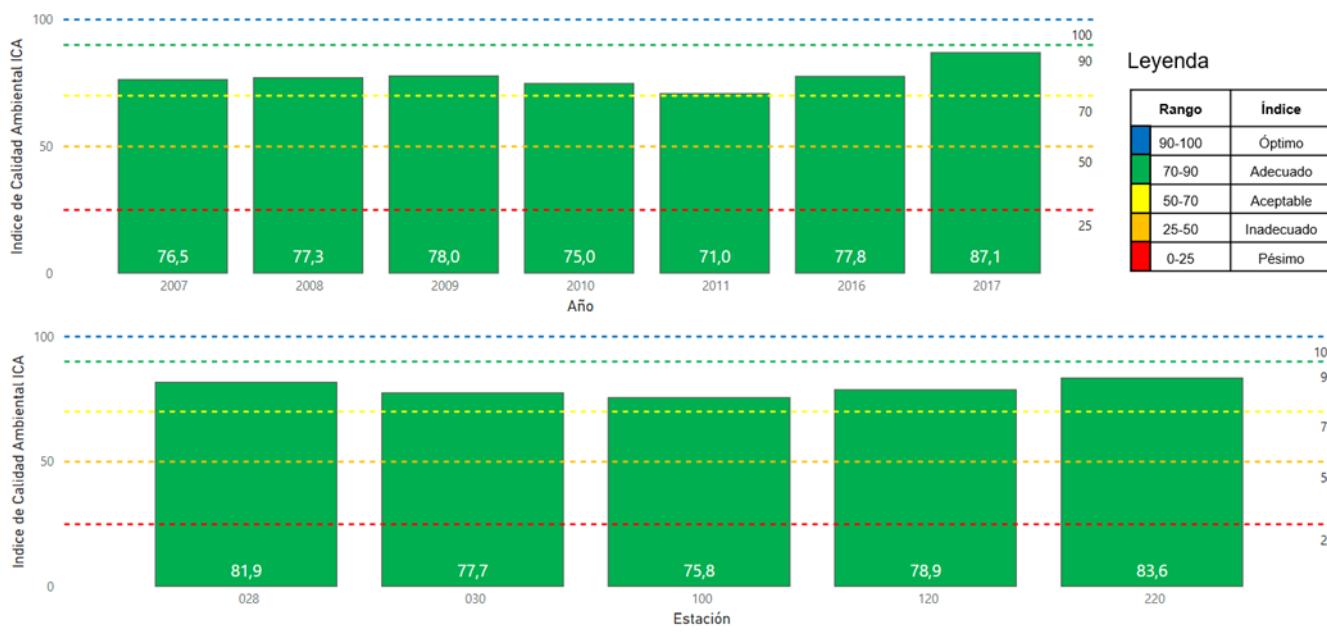
Análisis Estadísticos

Dada la cantidad de información levantada en la matriz de biota, no fue posible realizar análisis estadísticos entre sectores. Al aplicar una prueba estadística no paramétrica, no se observaron diferencias significativas entre los distintos periodos analizados (Kruskal Wallis, $H=2,88$, $gl=2$, $p=0,09$).

5.4 ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL COLUMNAS DE AGUA

Al determinar el Índice de Calidad Ambiental (ICA) de Columna de Agua según la metodología empleada en este estudio, se observa una condición promedio adecuada para los años 2007 a 2011 y 2016 a 2017. Este índice se aplicó en las estaciones y años donde existía información sobre Coliformes Fecales, Fosfato, Nitrato, Oxígeno Disuelto y Sólidos Suspensidos, parámetros considerados por el indicador. El desarrollo del índice a lo largo del tiempo incluye la toma de muestras correspondientes a estos parámetros.

El ICA histórico promedio en columna de agua varió entre 71,0 y 87,1. Las estaciones variaron en promedio entre 75,8 y 83,6; observándose los máximos en el último periodo (Figura 90).



Fuente: WSP (2025)

Figura 90: Índice de Calidad ambiental promedio histórica y por estación.

A continuación, se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el ICA de Calidad del Agua subdividido en las tres zonas previamente definidas para el análisis (Figura 91).

Posteriormente, se realiza un análisis puntual, espacial y temporal del ICA en el sedimento para cada estación por año, mostrando los resultados obtenidos. Los valores mínimos se registran en la estación 030 en 2010 con un índice de 70, en la estación 120 en 2011 con un índice de 69,8 y en la estación 100 en 2016 con un índice de 62,3, considerados como condición **Aceptable**. El valor máximo corresponde a la estación 028 en 2017, con un índice de 91,7, que indica una condición **Óptima**.

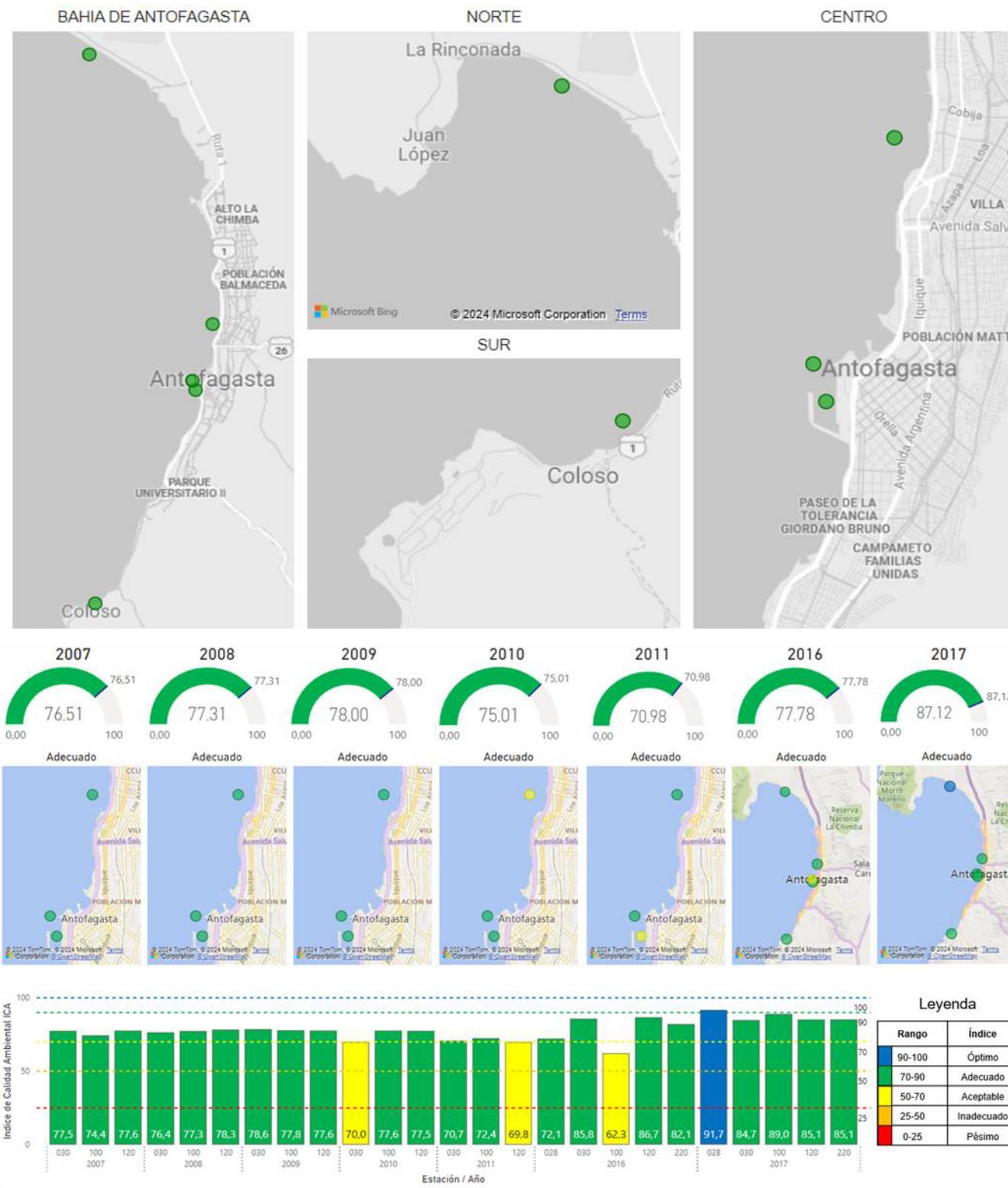
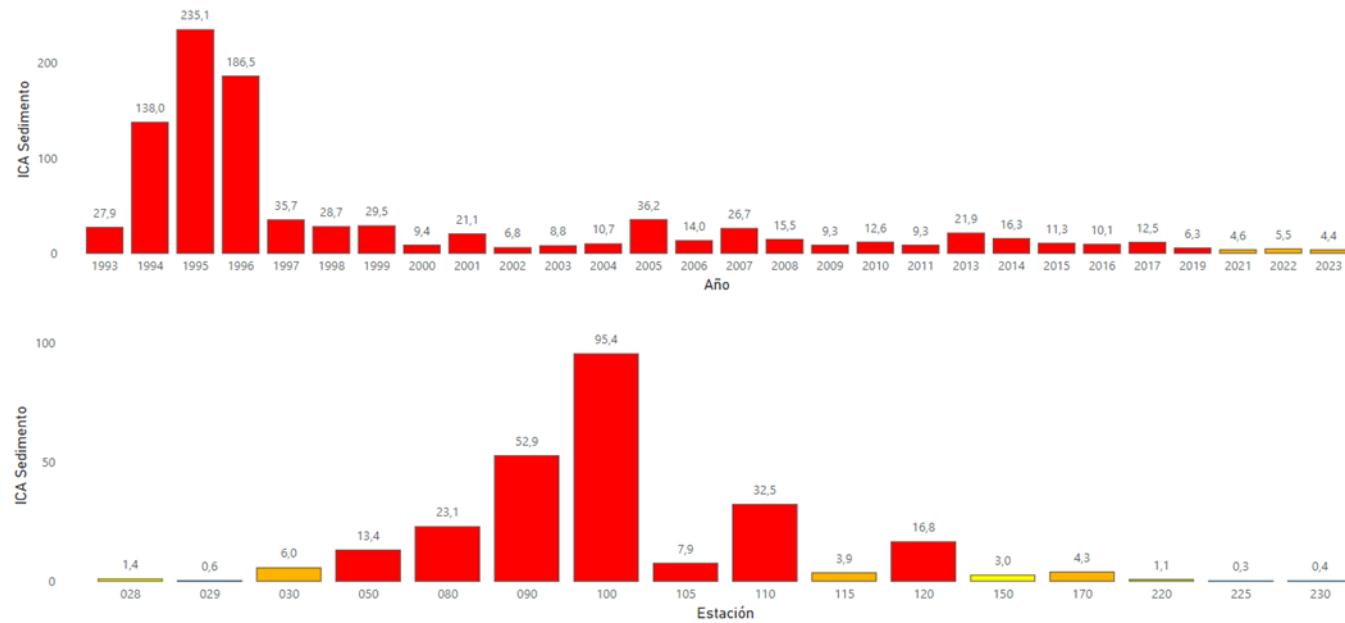


Figura 91: ICA Espacial promedio de la Bahía de Antofagasta. ICA puntual, espacial y temporal de la Bahía de Antofagasta.

5.5 ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL EN SEDIMENTO

El índice de Calidad Ambiental (ICA) de Metal en Sedimento refleja una condición promedio de **Alta Contaminación** entre los años 1993 a 2019 y **Contaminación Considerable** entre 2021 a 2023 (Figura 92). Es importante mencionar que este índice fue aplicado a las estaciones y años con información disponible para elaborar este índice vale decir: se ha calculado con los parámetros de Cadmio Total, Cobre Total, Plomo Total y Zinc Total en conjunto y, el desarrollo de este índice en el tiempo contempla la toma de muestras de estos parámetros relevantes para el indicador.

El ICA de Metal en Sedimento histórico promedio varió entre 4,4 y 235,1 y las estaciones variaron en promedio entre 0,3 y 95,4; observándose una evolución en el tiempo al encontrar los mínimos en el último periodo. Las principales estaciones con alto índice corresponden a 050, 080, 090, 100, 105, 110 y 120 correspondiente al sector Centro o Puerto de la Bahía de Antofagasta.



Fuente: WSP (2025)

Figura 92: Índice de Calidad ambiental de sedimento promedio histórica y por estación.

A continuación (Figura 93), se exhibe la distribución espacial y la disposición de las estaciones de monitoreo, incluyendo una gráfica de burbujas que representa el ICA en el Sedimento subdividiendo en las tres zonas previamente definidas para el análisis.

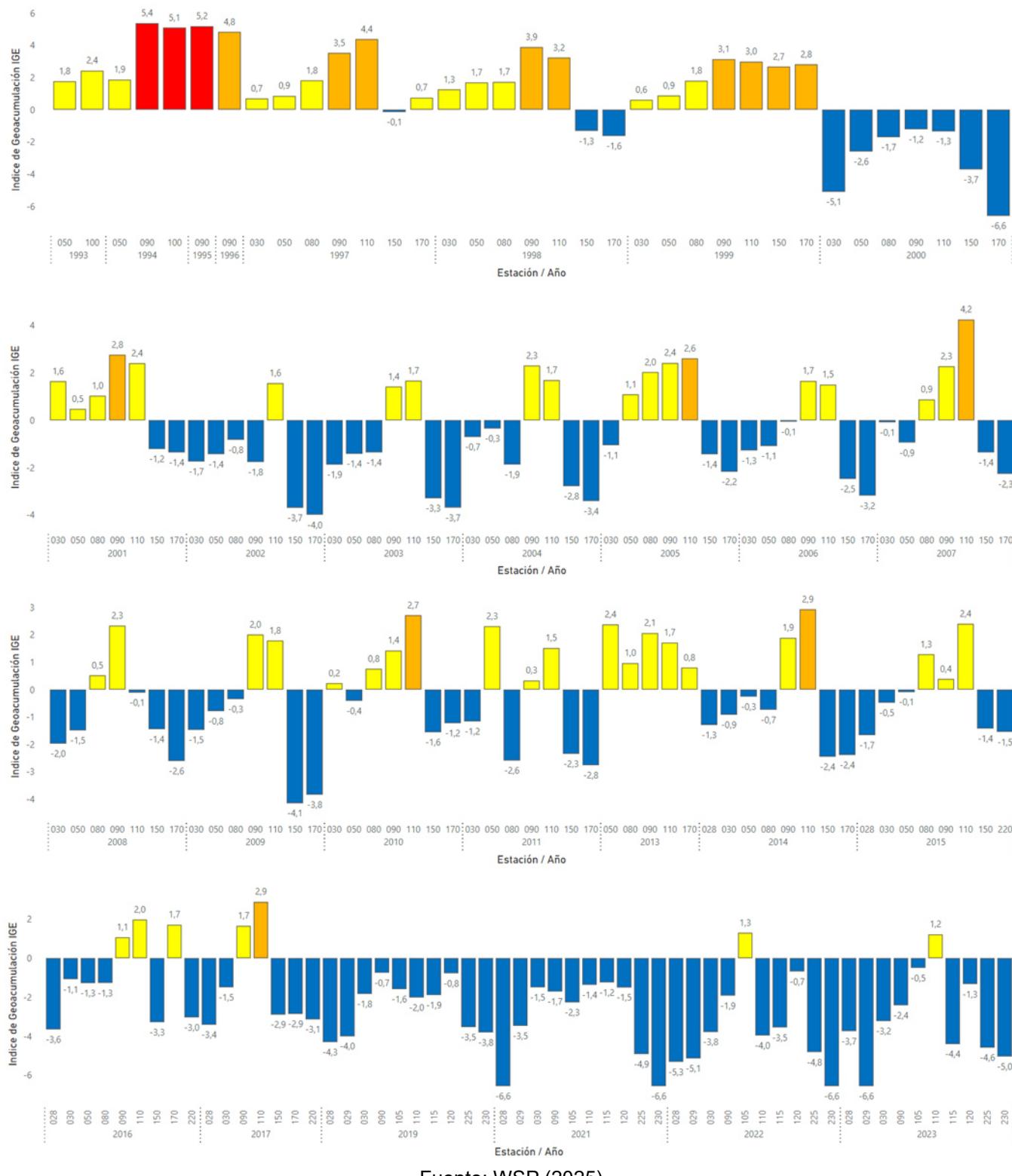


Figura 93: IGE sedimento histórico 1993-2023 por estación de la Bahía de Antofagasta.

6 DISCUSIÓN

La discusión de los resultados obtenidos del análisis de la información ambiental de la bahía de Antofagasta asociada al POAL, proporcionan una visión global y puntual de la evolución ambiental de la bahía, por lo que, en este capítulo, se interpretan resultados en el contexto de la información analizada de las distintas matrices ambientales, fuentes de emisión, mediciones, literatura existente, y sugerencias para futuras campañas.

Al respecto, es importante destacar que, la Bahía de Antofagasta presenta una importante intervención antrópica, constituyendo uno de los principales focos industriales relacionado al rubro minero, intercambio de mercancías, descarga de residuos, entre otros (Valdés *et al.*, 2015). Por este motivo, resulta pertinente vincular las concentraciones de los distintos parámetros fisicoquímicos analizados (por ejemplo, nutrientes, metales pesados y otros) con las diversas actividades industriales presentes en la Bahía, así como con la hidrodinámica del sector.

La hidrodinámica del sector muestra que la Bahía se encuentra sujeta a áreas de retención o sombras de surgencias. La circulación forzada por el viento y la surgencia produce el desarrollo de una zona frontal que induce a un sector de retención interior y giro ciclónico de corriente (Escribano & Hidalgo, 2001). Esto requiere una especial atención, dado que se relaciona con la capacidad de renovación de sus aguas y la vulnerabilidad del ecosistema frente a impactos antropogénicos

Discusión resultados datos POAL

Del análisis de la base de datos POAL, se puede observar que para la mayoría de los parámetros existe una concentración mayor en el sector del Puerto, principalmente asociado a estaciones que se encuentran en zonas “protegidas”, tal es el caso de estaciones de muestreo como “antepuerto” y “poza puerto”, los cuales representan lugares estratégicos de protección contra factores ambientales y, por tanto, sectores que podrían propiciar procesos de acumulación.

Matriz de agua de mar

Entre los parámetros analizados, las mayores concentraciones de aceites y grasas se observaron en la zona del puerto (estación 100), durante el primer año de medición (1997) mostrando una superación del límite establecido en la norma de referencia utilizada (D.S. N° 004-2017-MINAM) de 5 mg/L. En relación con esto, se ha mencionado que la emisión de aceites y grasas e hidrocarburos en el norte del país se debe principalmente a las empresas sanitarias, en donde la región de Antofagasta ha ocupado el sexto lugar a nivel nacional, a través de la eliminación de desperdicios y aguas residuales (CEA, 2020). Cabe señalar que, durante los últimos años analizados, entre 2008 y 2011, no se observó superación del límite de detección de 5 mg/L, que coincide con el límite establecido en la norma de calidad del Perú.

Los valores de los metales disueltos observados en la matriz de agua (arsénico, cobre, cromo, y zinc) muestran valores similares a los reportados por Valdés *et al.* (2015) durante los años 2008 y 2011. En dicho trabajo se concluye que las aguas costeras de la bahía de Antofagasta, para el periodo analizado, se pueden considerar aptas para la conservación de comunidades

acuáticas y para el uso humano, de acuerdo con las legislaciones ambientales. Ahora bien, es importante considerar que las concentraciones de cobre en esta matriz, posterior al año 2009, muestran un importante aumento, superando la norma ANZECC/ARMCANZ de 1,3 µg/L, siendo el único metal en el agua que sobrepasa dicha norma, lo que concuerda con lo señalado en el “Informe de Análisis de Riesgo Ambiental en bahía San Jorge, Antofagasta” (CEA, 2020).

En relación con el estado del oxígeno disuelto, se analizó la información disponible entre los años 2007 y 2017. Se observaron altas concentraciones de oxígeno con poca variabilidad, excepto en la estación 100 (antepuerto) donde se observa la máxima concentración el año 2007 (9,28 mg/L) y la mínima el año 2016 (5,0 mg/L). Los valores de oxígeno disuelto son compatibles con la conservación del ambiente acuático según el límite establecido en la norma de referencia utilizada (D.S. N° 004-2017-MINAM) de 4 mg/L.

En relación con los nutrientes y en el contexto del análisis de eutrofización, se evaluaron los niveles de amonio, nitrato y fosfato. El amonio registró las concentraciones más elevadas durante los primeros años de medición, alcanzando un “peak” en 1998, comportamiento consistente con lo descrito por el CEA (2020). Posteriormente, se observó una tendencia decreciente en los períodos siguientes. Por su parte, el nitrato muestra concentraciones relativamente constantes en el tiempo, presentando un alza el año 2004, donde se observó superación del límite establecido en la norma de referencia (D.S. N° 004-2017-MINAM) de 200 mg/L. Al igual que en el caso del amonio, esto es similar a lo registrado en el informe de CEA (2020). Posteriormente se observa otra alza de menor magnitud el año 2016. El fosfato también muestra concentraciones constantes en el tiempo, aunque el último periodo que fue analizado por ANAM, se diferenció estadísticamente de los períodos anteriores. Cabe señalar que, durante los últimos 3 años, este parámetro estuvo bajo un límite de detección mayor a lo previamente analizado, lo que podría explicar esta diferencia.

En relación con los parámetros vinculados a la salud poblacional, las concentraciones de coliformes fecales experimentaron un incremento en el año 1995, seguido de una tendencia a la baja en los años posteriores, observándose las mayores concentraciones en el sector puerto. Sin embargo, no se observó diferencias significativas entre períodos ni entre los sectores. Cabe señalar que las mayores concentraciones entre el año 1995 y 1996 se presentaron en el sector “centro” de la bahía, en las estaciones 060, al norte del puerto y la 130, al sur de este. Es relevante mencionar que un poco más al norte de la estación 060, se encuentran plantas de tratamiento de aguas servidas. Posterior al año 1996, no se observaron valores sobre 2.000 NMP/100ml, el cual es el límite establecido en la norma de referencia utilizada (D.S. N° 004-2017-MINAM) para aguas marinas.

En cuanto a las características físicas del agua, se evaluaron los sólidos suspendidos totales, los cuales no presentaron un patrón temporal definido. Cabe señalar que sólo se contó con información entre los años 2007 y 2017. Espacialmente, se observaron valores elevados en el sector del puerto (superación del límite establecido por el D.S. N° 004-2017-MINAM de 30 mg/L), adicionalmente, se observan altos valores al norte y sur de la bahía durante el año 2016, no presentando diferencias significativas entre sectores. Esto podría estar relacionado con la presencia de proyectos operativos de plantas desalinizadoras tanto en el norte como en el sur de la bahía, o bien por características particulares de la bahía de Antofagasta.

Matriz Sedimento

Los parámetros que superan mayormente las normas de referencia se relacionan a la matriz sedimentaria, lo que indica una mayor vulnerabilidad en esta matriz y da cuenta de la naturaleza conservativa de los parámetros en el sedimento, el cual es capaz de conservar y definir patrones en distintos lugares y tiempos, además de los distintos orígenes de la materia orgánica, discriminando distintas fuentes de contaminación (Meyers, 1994; Sanchez-Cabeza & Druffel, 2009).

Al respecto, en el estudio de levantamiento de información para el control ambiental en la bahía de Antofagasta (FNDR-CONAMA, 2012) se indicó que, durante los 4 años analizados (2008-2011) los sedimentos presentaron cargas importantes de metales pesados, siendo una parte de ellos consecuencia de los aportes naturales producidos en el ambiente marino. Sin embargo, existen metales como el Cu, Zn y Pb que evidencian un enriquecimiento que estaría explicado por la actividad relacionada a los embarques de minerales que se desarrolla en la bahía.

La mayor concentración de metales pesados en el sedimento se encontró en el sector del Puerto, lo que concuerda con lo señalado por Calderón y Valdés (2012), quienes monitorearon metales en 7 puntos dentro de la bahía de Antofagasta el año 2008, y concluyeron que la distribución y concentración de los metales analizados (Cu, Zn y Pb) dentro de la bahía, está influenciada por las actividades antrópicas desarrolladas en la zona costera.

Se ha señalado que los valores de cobre en los sedimentos de la bahía de Antofagasta presentan valores superiores a otros ambientes marinos de la costa de Chile (Calderón y Valdés, 2012). En la información histórica del POAL se observa superación del límite referencial de efecto mínimo (32 mg/kg) y máximo (275 mg/kg) de la OMI (2017), durante todo el periodo analizado, principalmente en las estaciones ubicadas en el sector del puerto. Sin embargo, también es relevante señalar que se observa una disminución de la concentración de este metal en el tiempo, encontrándose gran parte de los datos bajo el límite de detección durante los últimos años (2021-2023).

Es relevante destacar los valores de Zinc y Plomo registrados a lo largo del tiempo en la estación 090 (Poza del Salitre/Club de Yates), ubicada al norte del Puerto de Antofagasta. Al respecto, Calderón y Valdés (2012) señalaron que, al momento de realizar su estudio, en las inmediaciones del Puerto de Antofagasta se realizaba acopio y embarque de Zinc proveniente de yacimientos mineros del norte y sur de Bolivia, lo que podría influir en la acumulación de este metal en los sedimentos costeros. Además, indicaron que desde hace más de 5 décadas se realizan embarques de concentrado de plomo proveniente de minas explotadas en territorio boliviano (Salamanca *et al.* 2004). Es importante destacar que las concentraciones de zinc en el sedimento mostraron una tendencia decreciente a lo largo del tiempo; no obstante, la información disponible sólo abarca hasta el año 2011. De manera similar, se registra una disminución en las concentraciones de plomo en el sedimento hasta el año más reciente analizado (2023).

En cuanto a la materia orgánica los mayores valores se observaron durante los primeros años de medición, hasta el 2022, donde se observaron estaciones con valores sobre la norma de referencia que en este caso fue la Res. Ex. N°3612/2009 y sus modificaciones, usada para la

acuicultura y donde el límite de aceptabilidad para materia orgánica es de $\leq 9\%$. Posteriormente, se registró una disminución significativa entre los años 2003 y 2008, seguida de un incremento en los años posteriores, sin que se superara el límite de aceptabilidad establecido. Las estaciones con los valores más elevados de este parámetro varían según el año, pero se localizan principalmente en la zona central de la bahía, próxima al Puerto, conforme a lo indicado en el informe CEA (2020). Este parámetro es relevante ya que la materia orgánica es un factor que controla el contenido de metales en los sedimentos acuáticos. La materia orgánica tiende a adsorber metales en su tránsito por la columna de agua y a acumularlos en los sedimentos de fondo. Además, el tamaño de partículas también influye, ya que los sedimentos más finos adsorben una mayor cantidad de metales debido a su mayor superficie relativa (Valdés & Sifeddine, 2009; Tribovillard *et al.*, 2006; Cobelo-García & Prego, 2004).

Matriz Biota

La biodisponibilidad de metales en los sedimentos tiene una acción directa sobre algunas especies acuáticas, muchas de las cuales acumulan altas concentraciones con efectos crónicos en sus poblaciones (Acosta *et al.* 2002). La distribución y concentración de algunos metales dentro de la bahía está influenciada por las actividades antrópicas desarrolladas en la zona costera, y particularmente los sectores en donde se ubican puertos de embarque revisten un riesgo para las comunidades de organismos bentónicos (Calderón y Valdés, 2012).

Al respecto, en el análisis del tejido del chorito maico, se observa superación del Criterio de Protección Ecológica de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) para metales en tejidos en gran parte de la información analizada. Esto ocurre en la mayoría de los puntos de muestreo y en la mayoría de las campañas. Las mayores magnitudes y varianza del contenido de metales ocurren al sur del Puerto de Antofagasta, lo que coincide con lo indicado en el informe CEA (2020). También es relevante el hecho de que el plomo, mercurio y arsénico presentan un alza el 2014, en las 3 estaciones analizadas, 001 al norte de la bahía, 020 al norte del puerto, y 140 al sur del puerto.

En el informe de CEA (2020) se menciona que estudios previos asociados a redes tróficas detectaron niveles de bioacumulación importantes en recursos marinos correspondientes a loco, pulpo, locate, lapa, ostión y navajuela, con contenidos de plomo y cobre que exceden límites normativos nacionales. Se destaca el hecho que estos recursos representan los mayores desembarques de pesca artesanal, por lo que podrían constituir una vía de exposición para el ser humano.

Ahora bien, considerando lo anterior podría ser relevante mencionar lo relativo al Reglamento Sanitario de los Alimentos (Art. N° 160, Decreto N° 977/1997), el cual regula los límites máximos de la concentración de metales en mariscos frescos (mercurio de 0,5 mg/kg, plomo de 2,0 mg/kg, cobre de 10 mg/kg, y zinc de 100 mg/kg). Al respecto, el único límite de este decreto que es mayor o más exigente que la norma de referencia analizada en este informe (NJDEP, 2009), y mayor que los valores presentados por Ahumada *et al.* (2006), fue el cobre. Por lo anterior, estos límites, al igual que en el Criterio de Protección Ecológico de la EPA han sido sobrepasados en gran parte de la información analizada en el presente estudio.

Índice de calidad ambiental columna de agua

Según el índice de calidad ambiental ICA implementado para la bahía de Antofagasta, la matriz de columna de agua revela una mejora en la calidad entre 2007-2011 y 2016-2017, con valores promedio que variaron de 71,0 a 87,1 y de 75,8 a 83,6 entre estaciones, lo que indica una condición “Adecuada” del índice. Los valores más altos del índice se observaron en el periodo más reciente, indicando una tendencia positiva. Sin embargo, los valores mínimos fueron registrados en la estación 030, al norte del puerto, en 2010 (70,0), la estación 120 en el puerto en 2011 (69,8), y en la estación 100, también en la zona del puerto, en 2016 (62,3), reflejando condiciones “Aceptables”. El índice máximo, de 91,7, se alcanzó en la estación 028 en el sector norte de la bahía en 2017, mostrando una condición “Óptima”. Estos resultados sugieren una mejora en la gestión de la calidad del agua.

En un estudio de levantamiento de información para el control ambiental (FNDR-CONAMA, 2012), se señala que la bahía en general presenta aguas de buena calidad, aptas para el uso recreativo con contacto directo. Sin embargo, un análisis más detallado de esta matriz puede evidenciar el impacto de la actividad industrial sobre el entorno marino, como puede observarse en la distribución de algunos metales pesados. El mismo estudio señala que esta situación, aparentemente contradictoria, sugiere que los niveles establecidos en las legislaciones ambientales no corresponderían a valores representativos de ambientes libres de contaminación.

El desarrollo de índices de calidad es relevante ya que es una herramienta de gestión que permite la toma de decisiones o acciones a partir de mediciones empíricas, permitiendo conocer y mejorar la condición actual del cuerpo de agua. Esto permite tomar acciones como prohibir un tipo de vertimiento de alguna sustancia, o establecer metas para la mejora en la escala de calidad (Calderón, 2019). En el caso de la bahía de Antofagasta, y considerando la data histórica provista por el POAL, los menores valores del índice (menor calidad) se deben principalmente a las concentraciones de fosforo, y en menor medida a las concentraciones de sólidos suspendidos totales. Aquí se destaca el hecho de que Antofagasta no cuenta con una Norma Secundaria en materia de calidad de agua para estos parámetros, lo que hace referencia sólo a normativas internacionales, que, si bien permiten comparar los valores, hace notar la importancia de que las concentraciones sean normadas también en este cuerpo de agua.

Índice de calidad ambiental (ICA) de Sedimento e Índice de Geoacumulación (IGE)

El Índice de Calidad Ambiental (ICA) de Sedimento ha indicado una condición de Alta Contaminación desde 1993 hasta 2019, y de Contaminación Considerable entre 2021 y 2023, basado en datos de Cadmio, Cobre, Plomo y Zinc Totales. Históricamente, el ICA ha variado entre 4,4 y 235,1, mostrando una mejora reciente. Las estaciones ubicadas en el sector Centro o Puerto de la Bahía de Antofagasta, específicamente las estaciones 050, 080, 090, 100, 105, 110 y 120, registran los niveles más altos de contaminación según el ICA. El valor máximo histórico de 235,1 se registró en la estación 090 en 1995, mientras que los mínimos se encuentran en las estaciones extremas Norte y Sur, con contaminación Moderada a Baja. Aunque la Alta Contaminación ha disminuido, solo dos estaciones (110 y 120) aún presentan índices altos, en comparación con los años anteriores al 2000.

En cuanto al Índice de Geoacumulación (IGE), se observa una evolución notable a lo largo del periodo comprendido entre 1993 y 2023, destacándose una tendencia predominante de Baja Geoacumulación en los años más recientes, precedida por episodios de Geoacumulación Moderada registrados en 2001, 2005, 2010 y 2013. Anteriormente, entre 1993 y 1999, el índice fluctuó entre Moderada y Alta Geoacumulación, siguiendo un patrón de campana gaussiana. Históricamente, el IGE ha variado entre -3,4 y 5,2, con mejoras notables en los valores más recientes. Las estaciones con alta acumulación se localizan en el sector Centro o Puerto de la Bahía de Antofagasta, mientras que las estaciones extremas Norte y Sur presentan condiciones de contaminación Moderada a Baja. El valor máximo histórico de 5,2 se registró en la estación 090 durante el año 1994. Posteriormente, se ha observado una reducción en la Geoacumulación Alta, evidenciada por la presencia de únicamente una estación (110) con Geoacumulación Moderada (1,2). Estos datos reflejan una mejora general en la calidad del sedimento.

Unidades fiscalizables reguladas por la autoridad marítima

Respecto de las unidades fiscalizables reguladas por la autoridad marítima en la bahía de Antofagasta y su relación con la información analizada en el presente informe, es necesario recordar que la ubicación de las estaciones de monitoreo se han definido en base a las actividades antropogénicas que se desarrollan en el borde costero, dado que uno de los objetivos del POAL es realizar el seguimiento de los principales contaminantes que se descargan a los cuerpos de agua de jurisdicción de la Autoridad Marítima, como resultado de las diferentes actividades que ahí se desarrollan (Figura 94, Figura 95 y Figura 96).

Del análisis, es posible indicar que los resultados muestran en general una asociación entre el sector que se ha denominado “Centro” de la bahía con los valores de concentración más altos para una gran parte de los parámetros analizados en la matriz de agua y sedimento. También es la zona donde se concentra la mayor cantidad de estaciones. Las altas concentraciones, generalmente están asociadas a estaciones en el sector del Puerto (100, 110, 120). Es importante subrayar que, aunque las unidades fiscalizables, en particular los puertos y terminales marítimos, no producen una descarga líquida como tal, la actividad portuaria, junto con las operaciones auxiliares y de servicios, pueden generar emisiones potenciales a la bahía, especialmente en la columna de agua que pueden hacer variar las concentraciones de algunos parámetros. Lo anterior también se ve reflejado en los valores del índice de calidad de agua (ICA) que presenta menores valores (menor calidad) en estaciones al centro de la bahía, en determinados años. Cabe señalar que estos menores valores del ICA de agua siguen siendo aceptables.

La estación 030, ubicada también en la zona “centro” de la bahía, pero al norte del puerto, también presentó altas concentraciones de algunos parámetros, como amonio, nitrato y sólidos suspendidos totales en la matriz de columna de agua. Lo anterior podría relacionarse en parte por la cercanía de dicha estación con empresas de categoría Sanitaria y Desaladoras, sin embargo, también se deben considerar las características oceanográficas propias de la bahía, que en el caso de los nutrientes presentan variabilidad asociada al proceso de surgencia, incrementando la productividad de la bahía. Por otro lado, las estaciones 060 y 130, al norte y sur del puerto respectivamente, presentaron altos valores de coliformes fecales en los primeros años de monitoreo, lo que podría asociarse a la cercanía con plantas de tratamiento de aguas

servidas. Sin embargo, las concentraciones de este parámetro fueron disminuyendo en el tiempo.

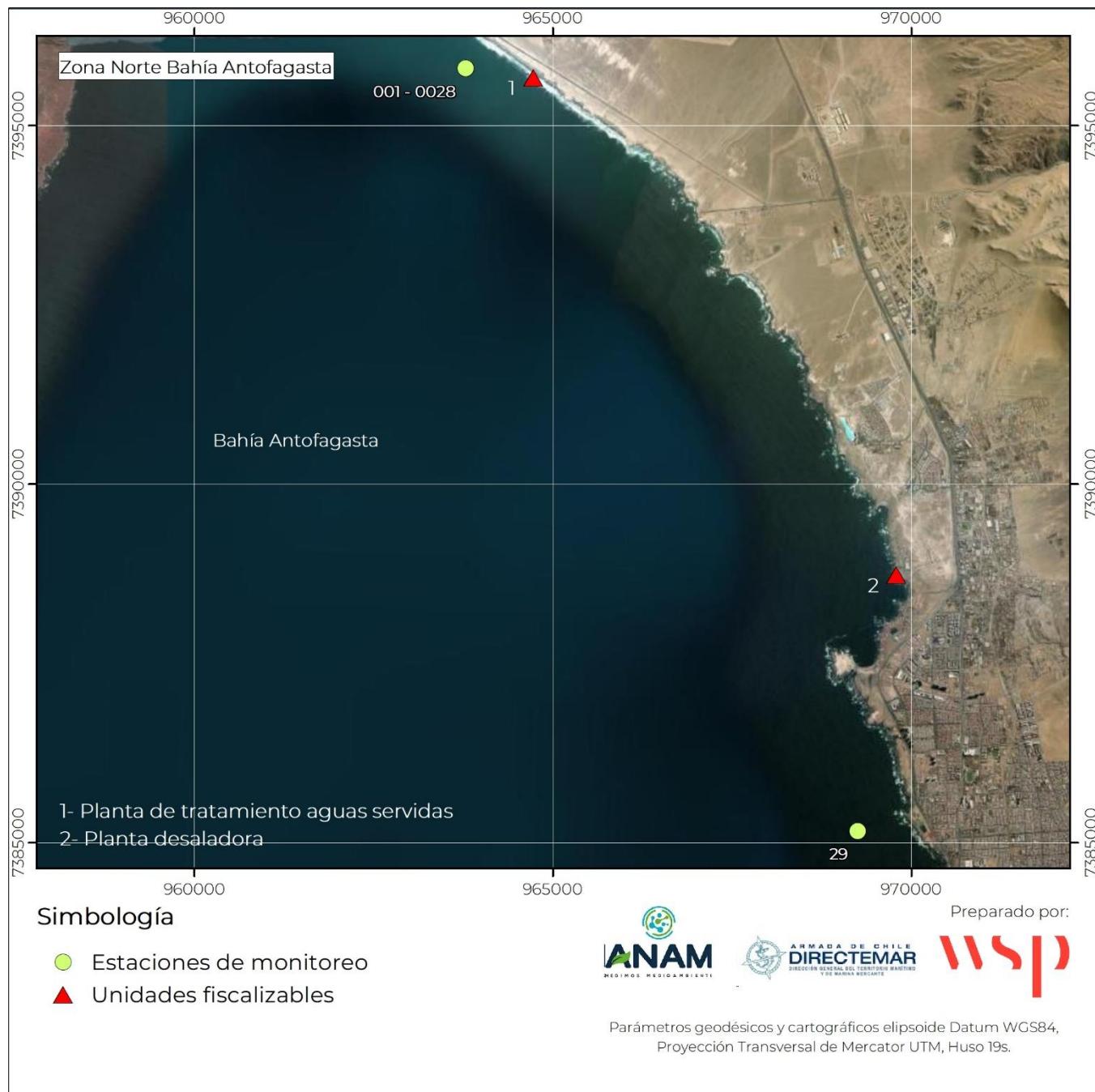


Figura 94: Ubicación de las Unidades Fiscalizables operativas junto con la ubicación de las estaciones de monitoreo del POAL para las matrices de agua, sedimento y biota, en el Norte de la bahía de Antofagasta.

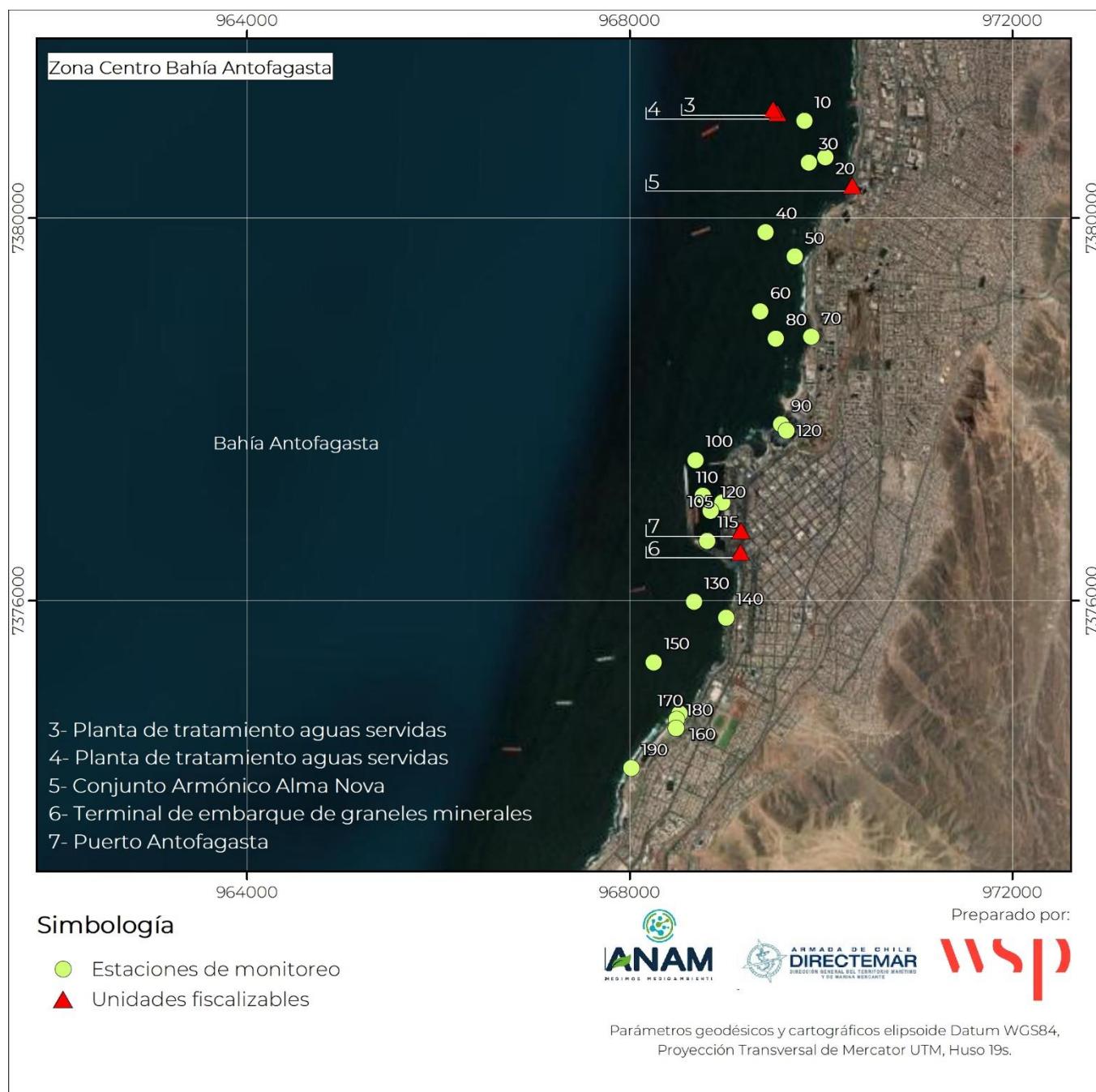


Figura 95: Ubicación de las Unidades Fiscalizables operativas junto con la ubicación de las estaciones de monitoreo del POAL para las matrices de agua, sedimento y biota, en el Centro de la bahía de Antofagasta.

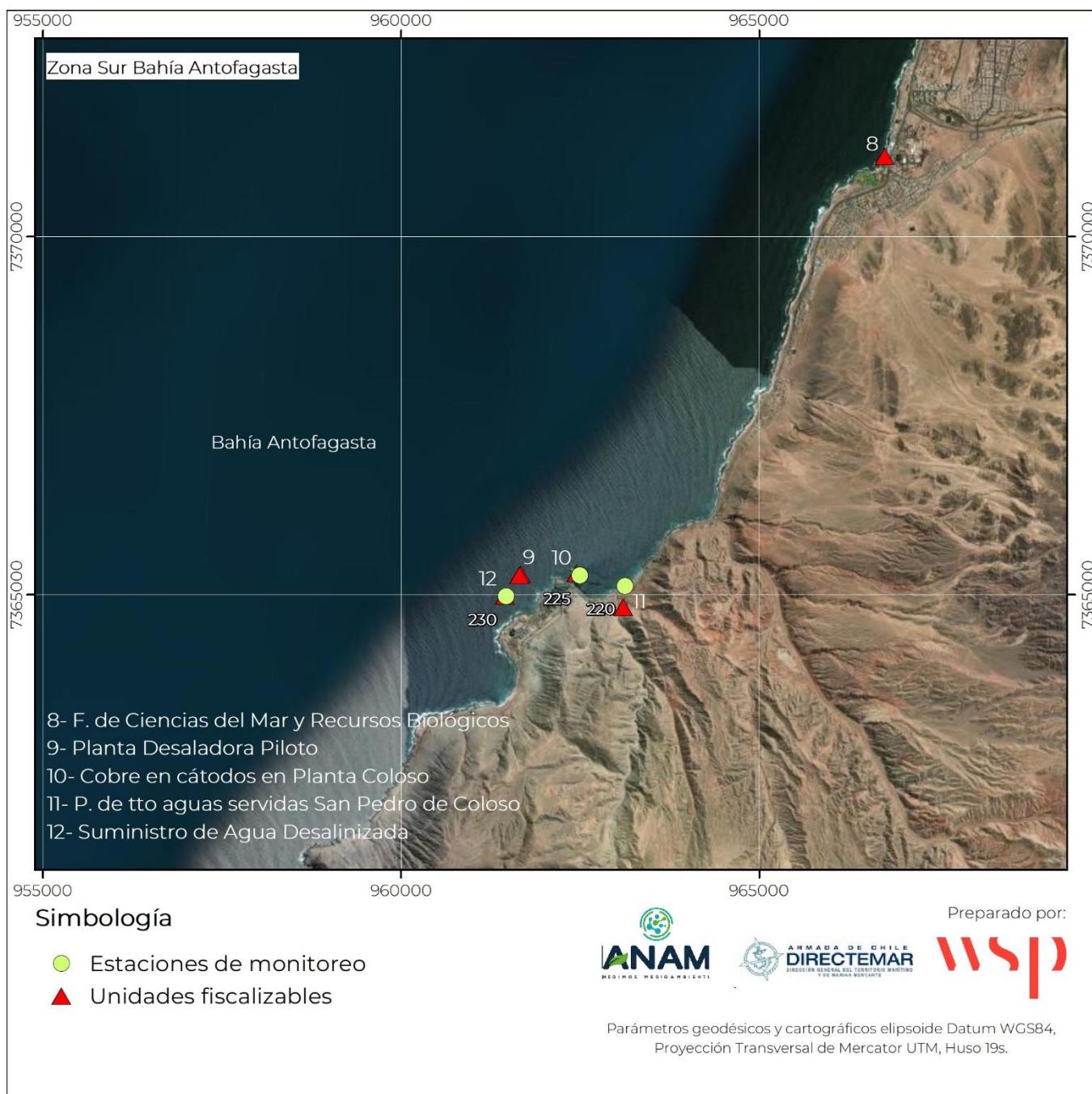


Figura 96: Ubicación de las Unidades Fiscalizables operativas junto con la ubicación de las estaciones de monitoreo del POAL para las matrices de agua, sedimento y biota, en el Sur de la bahía de Antofagasta.

En cuanto al sedimento marino, las zonas costeras frecuentemente son el depósito final de residuos orgánicos e inorgánicos asociados a las actividades industriales y urbanas que se desarrollan en su entorno. En zonas industrializadas y portuarias, los residuos de dicha actividad usualmente contienen una alta carga de metales pesados, lo que, eventualmente, puede

modificar sus concentraciones naturales en los ambientes marinos (Luoma 1990, Giordano *et al.* 1992, French 1993; Calderón & Valdés, 2012). Lo anterior concuerda con la alta presencia de metales en los sedimentos asociados a la zona del puerto (90, 100, 110), lo que concuerda con otros trabajos realizados en la bahía (Calderón & Valdés, 2012; Salamanca *et al.* 2004). Sin embargo, también se debe destacar la disminución que han tenido en el tiempo las concentraciones de estos elementos, lo que se ve reflejado también en la variación temporal de los índices de calidad de sedimento y de geoacumulación, que se encuentran en base a metales, y que han mostrado una mejora general en la calidad del sedimento.

En el caso de las estaciones asociadas a la matriz de Biota, estas presentan una mayor variabilidad temporal que espacial, como se ve en el caso del el plomo, mercurio y arsénico que presentan un alza el 2014, en las 3 estaciones analizadas, 001 al norte de la bahía, 020 al norte del puerto, y 140 al sur del puerto. Esto podría sugerir que su acumulación en el tejido depende más bien del comportamiento general de la bahía, que de su ubicación respecto a las unidades fiscalizables.

Consideraciones finales

A partir del análisis realizado, es muy importante destacar que se ha constatado que, cambios de laboratorio y técnicas analíticas pueden dificultar la búsqueda de patrones y su posterior discusión, principalmente cuando se consideran distintos límites de detección y cuantificación, razón por la cual es de interés asegurar la continuidad de los métodos y controles de calidad de la información que será levantada en cada campaña del POAL.

Finalmente, tras el análisis de los datos disponibles del POAL, que van desde 1993 hasta 2023, el estudio ha permitido distinguir comportamientos temporales y espaciales de distintos parámetros en la matriz de agua, biota y sedimento. Este enfoque ha proporcionado una visión detallada de la evolución ambiental de la Bahía de Antofagasta, tanto a nivel agregado como desagregado, identificando patrones específicos en cada sector de la bahía analizado. Por lo tanto, es recomendable continuar en futuras campañas o análisis, con el cálculo de los indicadores de calidad que se han implementado en este estudio, lo cual permitiría mantener un seguimiento de la evolución de la salud ambiental de la Bahía de Antofagasta.

7 CONCLUSIONES

El análisis realizado en el presente estudio permitió evaluar la evolución ambiental de la Bahía de Antofagasta entre los años 1993 y 2023, integrando información histórica de las matrices de agua de mar, sedimento y biota proveniente de la base de datos POAL. Esto permitió identificar tendencias de mejora en la calidad ambiental durante los últimos años, lo que podría atribuirse al fortalecimiento normativo, fiscalización y avances tecnológicos implementados en la bahía.

De forma específica, del análisis se concluye lo siguiente:

1. La Bahía de Antofagasta es una bahía semicerrada la cual se encuentra influenciada por la circulación forzada por el viento y fenómenos de surgencia, lo que genera zonas de retención interior y giros ciclónicos que afectan la capacidad de renovación de sus aguas, aumentando su vulnerabilidad frente a impactos antropogénicos.
2. Las unidades fiscalizables presentes en la Bahía de Antofagasta, que incluyen plantas sanitarias, terminales marítimos, industrias mineras y desaladoras, representan fuentes relevantes de presión ambiental sobre el ecosistema costero.
3. Del análisis de la base de datos POAL se observa que las mayores concentraciones de parámetros ambientales evaluados en las matrices de agua, sedimento y biota se registran en el sector “Centro” de la bahía, donde la hidrodinámica favorece la acumulación.
4. Los parámetros que superan mayormente las normas de referencia se relacionan a la matriz sedimentaria, lo que indica una mayor vulnerabilidad en esta matriz y da cuenta de la naturaleza conservativa del sedimento.
5. En el caso de la Matriz de Biota, se observó superación de la norma de referencia para metales en tejidos, en gran parte de la información analizada. Las estaciones asociadas a esta matriz presentan una mayor variabilidad temporal que espacial, por lo que no se observa una relación directa en su ubicación respecto de las unidades fiscalizables, sino más bien a la dinámica de la bahía en general.
6. El Índice de Calidad Ambiental (ICA) para la matriz de agua, implementado en base a Coliforme Fecales, Fosfato, Nitrato, Oxígeno Disuelto y Solidos Suspendidos, refleja una condición Adecuada para los períodos evaluados (2007-2011 y 2016-2017). Los menores valores del ICA (menor calidad) se deben principalmente a las concentraciones de fosforo, y en menor medida a las concentraciones de sólidos suspendidos totales. Se observa una mejora en la calidad entre los años 2007-2011 y 2016-2017, lo que sugiere una mejora en la gestión de la calidad del agua.
7. El Índice de Calidad Ambiental (ICA) de Sedimento, basado en datos de Cadmio, Cobre, Plomo y Zinc, ha indicado una condición de Alta Contaminación (1993-2019), y de Contaminación Considerable (2021 y 2023), en el periodo analizado. Por su parte, el Índice de Geoacumulación (IGE) muestra una evolución significativa desde 1993 hasta 2023, con una tendencia predominante hacia una Baja Geoacumulación en los últimos años, indicando una mejora general en la calidad del sedimento.
8. Altas concentraciones de parámetros en columna de agua y sedimento generalmente están asociadas a estaciones en el sector del Puerto, lo que podría relacionarse a actividades industriales y urbanas que se desarrollan en su entorno.

La interacción entre la dinámica oceanográfica y las actividades de las unidades fiscalizables revela la necesidad de mantener una vigilancia constante y metodológicamente estandarizada. En este contexto, el POAL se consolida como una herramienta clave para la gestión ambiental marina, permitiendo orientar acciones de mitigación, fortalecer la fiscalización y apoyar la definición de normativas que resguarden la salud del ecosistema costero y de las comunidades que dependen de él.

8 LITERATURA

Abbasi, T., Abbasi, S., (2012). Water quality indices, water quality indices. 10.1016/C2010-0-69472-7.

Ahamad M., Song J., Sun H., Wang X., Mehmood M., Sajid M., Su P., Khan A., (2020) Contamination Level, Ecological Risk, and Source Identification of Heavy Metals in the Hyporheic Zone of the Weihe River, China. International Journal of Environmental Research and Public Health.

Ahumada R., L. Gerli, I. Sánchez y E. Fernández, (2006). Metales trazas en aguas costeras y organismos de canales y fiordos Australes. Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 45-49.

ANZECC/ARMCANZ. (2000). Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality Australian and New Zealand Environment and Conservation Council/Agriculture and Resource and Management Council of Australia and New Zealand, Canberra Act.

Bernal, P.A., F.L. Robles & O. Rojas. (1982). Variabilidad física y biológica en la región meridional del sistema de Corrientes Chile-Perú. Monogr. Biol., 2, 75-102.

Brown R. M., McClelland N. I., Deininger R. A. and Tozer R., (1970) "A Water Quality Index". Do we dare? Water and Sewage Works.

Calderón, C. & J. Valdés. (2012). Contenido de metales en sedimentos y organismos bentónicos de la bahía San Jorge, Antofagasta, Chile. Rev. Biol. Mar. Oceanogr., 47(1): 121-133.

Calderón, N. (2019)-01. Índice de calidad de aguas costeras para Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168096>

Centro de Ecología Aplicada (CEA). (2020). Informe NFORME FinalFINAL: Análisis de Riesgo Ambiental en Bahía San Jorge, Antofagasta. Gobierno Regional de Antofagasta, 722 pp.

Cobelo-García, A. & R. Prego. (2004). Influence of point source on trace metal contamination and distribution in a semi-enclosed industrial embayment: the Ferrol Ria (NW Sapin). Est. Coast. Shelf Sci., 60: 695-703.

Cooper, A. (1995). The Estuarine Index: A New Approach to Scientific Information Transfer. Ocean & Coastal Management. 25: 103-141.

Cooper, A., Ramm, AEL., & Harrison, TD. (1994). THE ESTUARINE HEALTH INDEX - A NEW APPROACH TO SCIENTIFIC-INFORMATION TRANSFER. *Ocean and Coastal Management*, 25(2), 103-141.

DIRECTEMAR. (2021). Programa de observación del ambiente litoral (P.O.A.L). Recuperado el 01 Agosto 2024 de <https://www.directemar.cl/directemar/intereses-maritimos/p-o-a-l-programa-de-observacion-del-ambiente-litoral/programa-de-observacion-del-ambiente-litoral-p-o-a-l>

Dunn, OJ (1961). Comparaciones múltiples entre medias. Journal of the American Statistical Association (JASA), 56: 54-64.

Dunnette, D. (1979)., A Geographically Variable Water Quality Index Used in Oregon., Journal of the Water Pollution Control Federation, Vol. 51, No. 1, 1979, pp. 53-61.

Escribano, R. & P. Hidalgo. (2001). Circulación inducida por el viento en Bahía de Antofagasta, norte de Chile (23°S). Revista de Biología Marina y Oceanografía 36 (1): 43 – 60

Escribano, R., Rosales, S. A., & Blanco, J. L. (2004). Understanding upwelling circulation off Antofagasta (northern Chile): A three-dimensional numerical-modeling approach. Continental Shelf Research, 24(1), 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2003.09.005>.

FNDR-CONAMA. (2012). Estudio Levantamiento De Información Para El Control Ambiental De La Bahía De San Jorge. Director. 489 pp

French P. (1993). Post-industrial pollutant levels in contemporary Sven estuari intertidial desiments compared to pre-industrial levels. Marine Pollution Bulletin 26: 30-35.

Giordano P, L Musmeci, L Ciaralli, P Vernillo, J Chirico, N Piccioni & S Costatini. (1992). Total content and sequential extractions of Hg, Cd and Pb in coastal sediments. Marine Pollution Bulletin 24: 350-357.

Graham, W., Largier, J. (1997). Upwelling shadows as nearshore retention sites: the example of northern Monterey Bay. Continental Shelf Research, Vol. 17, No. 5, pp. 509-532.

Gupta, I., Kumar, A., Singh, C., y Kumar, R. (2015). Detection and Mapping of Water Quality Variation in the Godavari River Using Water Quality Index, Clustering and GIS Techniques. Journal of Geographic Information System, 7: 71-84.

Hakanson, L. (1979). An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. A Sedimentological approach. Water Research, 14: 975-1001.

Karstensen, J., & Ulloa, O. (2009). Peru-Chile current system. Ocean currents, 385-392.

Lukas, R. 1986. The termination of the equatorial undercurrent in the Eastern Pacific. Progr. Oceanogr., 16: 63-90.

Luoma S. (1990). Processes affecting metal concentrations in estuarine and coastal sediments. In: Furnes R & P Rainbow (eds). Heavy metals in the marine environment, 225 pp. CRC Press, New York.

Meyers, P.A., (1994). Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. Chem. Geol. 114, 289–302.

Miravet, M. E., Ramírez, O., Montalvo, J., Delgado, Y., y Perigó E. (2009). Numerical and qualitative index to measure water quality in recreational Cuban coastal waters. Serie Oceanológica, 5.

Müller G. (1979). Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. Umschau 79: 778-783.

Naik S, Pradhan U, Karthikeyan P, Bandyopadhyay D, Sahoo RK, Panda US, Mishra P and Murthy MVR (2023) Ecological risk assessment of heavy metals in the coastal sediment in the South-western Bay of Bengal. *Front. Mar. Sci.* 10:1255466. doi: 10.3389/fmars.2023.1255466

Nguyen N.T.T, Hoi N.C., Loan D.K. (2013). Development of water quality index for coastal zone and application in Ha Long Bay. *VNU Journal of Earth and Environmental Sciences*, 29 (4), 43, 2013.

Nguyen, N. T. T., Sevando, M. (2019). Assessing Coastal Water Quality through an Overall Index. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(4), 2321-2330. <https://doi.org/10.15244/pjoes/90836>

Nives, S.G., (1999). Water quality evaluation by index in dalmatia. *Water Res.* 33, 3423–3440. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(99\)00063-9](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(99)00063-9).

Perumal K., Antony J., Muthuramalingam S. (2021) Heavy metal pollutants and their spatial distribution in surface sediments from Thondi coast, Palk Bay, South India. *Environmental Science Europe*. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00501-2>

Piñones, A., Castilla, JC., Guiñez, R., Largier, JL. (2007). Temperaturas superficiales en sitios cercanos a la costa en la Bahía de Antofagasta (Chile) y centros de surgencia adyacentes. *Ciencias Marinas* (2007), 33(1): 37–48.

Salamanca M, B Jara & T Rodriguez. (2004). Niveles de cu, pb y zn en agua y *Perumytilus purpuratus* en bahía San Jorge, norte de Chile. *Gayana* 68: 53-62.

Samboni, N., Carvajal, Y., y Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista de Ingeniería e Investigación*. 27: 172-181

Sanchez-Cabeza, J.A., Druffel, E.R.M., (2009). Environmental records of anthropogenic impacts on coastal ecosystems: an introduction. *Mar. Pollut. Bull.* 59, 87–90.

Schneider, W., R. Fuenzalida, R. Núñez, J. Garcés-Vargas, L. Bravo & D. Figueroa. (2007). Discusión del sistema de la corriente Humboldt y masas de agua en la zona norte y centro de Chile. *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*, 30(1), 22.

Siegel, S. & N.J. Castellan. (1988). *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*. 2nd Edition, 399 pp.

Sievers, H.A. & N. Silva. 1975. Masas de agua y circulación en el Océano Pacífico Sudoriental. Latitudes 18° S - 33° S. (Operación Oceanográfica MARCHILE VIII). *Cienc. Tecnol. Mar*, 1: 7-67.

Silva, S. & H.A. Sievers. 1981. Masas de agua y circulación en la región de la rama costera de la Corriente Humboldt. Latitudes 18° S - 33° S (Operación Oceanográfica MARCHILE X-ERFEN I). *Cienc. Tecnol. Mar*, 5: 5-20.

Strub, P.T., J.M. Mesias & C. James. 1995. Altimeter observations of the Peru-Chile Countercurrent. *Geophys. Res. Lett.*, 22(3): 211-214.

Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G., Perera, B.J.C., (2018). Development of a water quality index for rivers in west java province, Indonesia. *Ecol. Indic.* 85, 966–982. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.049>.

Téllez, E & Silva, O. (2017). Morro Moreno, Un Viejo Mapa Colonial y la Frontera Septentrional del Reino de Chile, Cuadernos de Historia N°47, Santiago, pp. 167-176.

Tribovillard, N., T. Algeo, T. Lyons & A. Ribouleau. (2006). Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chem. Geol.*, 232: 12-32.

Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H. (1961). Distribution of the Elements in some major units of the Earth's crust. *Geological Society of America, Bulletin* 72: 175-192.

Uddin, G., Nash, S., Olbert, A.I., (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecol. Indic.* 122, 107218 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>.

Ulloa, O., Escribano, R., Hormazabal, S., Quinonez, R., Ramos, M., Gonzalez, R., (2001). Evolution and biological effects of the 1997–98 El Niño in northern Chile. *Geophysical Research Letters* 28, 1591–1594.

Valdés, J., & Sifeddine, A. (2009). Composición elemental y contenido de metales en sedimentos marinos de la bahía Mejillones del Sur, Chile: evaluación ambiental de la zona costera. *Latin american journal of aquatic research*, 37(2), 131-141.

Valdés, J., Román, D., Guiñez, M., Rivera, L., Ávila, J., Cortés, P., & Castillo, A. (2015). Trace metal variability in coastal waters of San Jorge Bay, Antofagasta, Chile: An environmental evaluation and statistical approach to propose local background levels. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), 544–554. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.08.035>

Vivas–Aguas, L.J., J. Sánchez., B. Cadavid., J. Betancourt, M. Quintero., Y. Moreno., C. Santana., I. Cuadrado., K. Ibarra., M. Ríos., P. Obando y D. Sánchez. (2014). Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras del Caribe y Pacífico colombianos. Serie de publicaciones No. 4. Informe Técnico REDCAM 2013, INVEMAR, Santa Marta. 314 p.

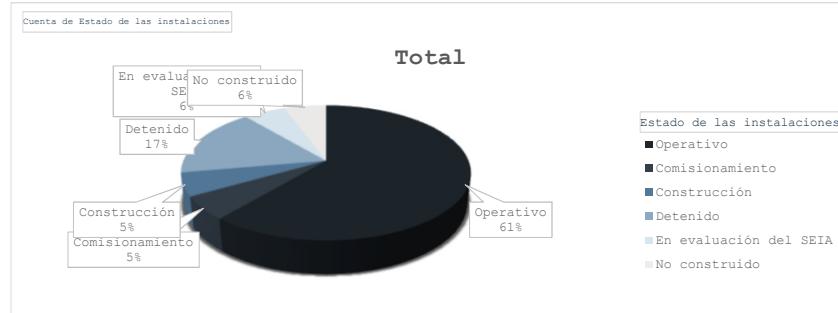
ANEXO A

**Unidades Fiscalizables Bahía
Antofagasta**

ANEXO "A"
UNIDADES FISCALIZABLES BAHÍA ANTOFAGASTA

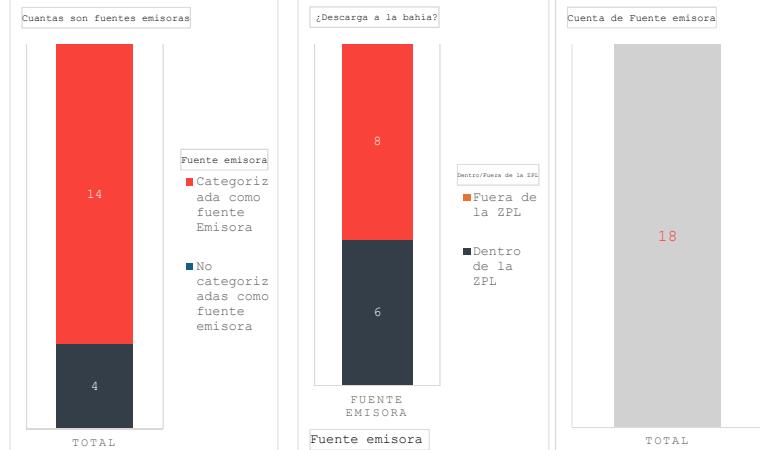
Estado de las unidades controladas por la autoridad: Bahía Antofagasta

Etiquetas de fila	Cuenta de Estado de las instalaciones
Operativo	11
Comisionamiento	1
Construcción	1
Detenido	3
En evaluación del SEIA	1
No construido	1
Total general	18



Cuántas son fuentes emisoras

Etiquetas de columna	No categorizadas como fuente emisora	Categorizada como fuente Emisora	Total general
Cuantas son fuentes emisoras	4	14	18



Cuántas descargan fuera o dentro

¿Descarga a la bahía?	Descarga a la bahía dentro o fuera de la ZPL	Fuera de la ZPL	Total general
Fuente Emisora	Dentro de la ZPL	Fuera de la ZPL	
Fuente Emisora	6	8	14
Total general	6	8	14

Cuenta de Fuente emisora	18
--------------------------	----

PROYECTO	EMPRESA	Fuente emisora	Categoría	Descarga al mar		Estado de las instalaciones
			fuente	Si/No	Dentro/Fuera de la ZPL	
			Categoría de Fuente	¿Descarga a la bahía?		
Disposición Final de Alcantarillado de la Ciudad de Antofagasta	Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A.	Si	Sanitaria	Si	Fuera	Operativo
Aumento de la Capacidad de Manejo de las Aguas Servidas de Antofagasta	Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A.	Si	Sanitaria	SI	Fuera	Construcción
Planta de Tratamiento de Aguas Servidas San Pedro de Coloso	Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A.	Si	Sanitaria	NO	NO	Operativo
Planta de tratamiento de aguas servidas de la Base Aérea Cerro Moreno	Base Aérea Cerro Moreno	Si	Sanitaria	Si	Dentro	Operativo
Facultad de Ciencias del Mar y Recursos Biológicos	Universidad de Antofagasta	Si	Centro de Cultivo Hidrobiológico	Si	Dentro	Operativo
Solicitud de Concesión de Acuicultura sector La Rinconada - Caleta Abtao - Bahía Moreno II Región - Antofagasta y regularización de instalaciones de apoyo al cultivo del ostión del Norte	Universidad de Antofagasta	Si	Centro de Cultivo Hidrobiológico	Si	Dentro	Detenido
Instalaciones Básicas de Apoyo a la Gestión Administrativa y al Personal, en el Borde Costero de la Concesión Marítima de Granja Marina S.A., Sector El Colorado	Granja Marina S.A.	Si	Centro de Cultivo Hidrobiológico	Si	Dentro	Detenido
Planta desaladora de agua de mar de Antofagasta II región - Chile	Aguas de Antofagasta S.A.	Si	Desaladora	Si	Fuera	Operativo
Ampliación Planta Desaladora Norte	Aguas de Antofagasta S.A.	Si (No evaluación)	Desaladora	Si	Fuera	Construcción
Planta Desalinizadora Piloto	Minera Escondida Ltda	Si	Desaladora	Si	Fuera	No Operativo
Terminal de embarque de graneles minerales	Antofagasta Terminal Internacional S.A.	No	Puerto	No	No	Operativo
Puerto de Antofagasta	Empresa Portuaria Antofagasta	No	Puerto	No	No	Operativo
Cobre en cátodos en Planta Coloso - Antofagasta	Minera Escondida Ltda	No	Puerto	No	No	Operativo
Lixiviación de sulfuros	Minera Escondida Ltda	Si	Minería	Si	Fuera	Operativo
Suministro Complementario de Agua Desalinizada para Minera Escondida	Minera Escondida Ltda	Si	Desaladora	Si	Fuera	Operativo
Conjunto Armónico Alma Nova: Sistema de descarga de exceso de agua lluvia	Inversiones y Renta Antofagasta S.A.	NO (No evaluada)	Conjunto habitacional	Si	Dentro	Operativo
Terminal Marítimo ENEX	Empresa Nacional de Energía ENEX S.A.	NO	Terminal marítimo	No	No	Detenido
Aguas Marítimas	CRAMSA Infraestructura SPA	Si (No evaluada)	Sanitaria	Si	Fuera	En evaluación del SEIA
Planta Desaladora Sur Antofagasta	Aguas de Antofagasta S.A.	Si	Desaladora	Si	Fuera	No construido
Extensión de Vida Útil con Transición Hídrica - Compañía Minera Zaldívar	Compañía Minera Zaldívar SpA	NO	Minería	NO	NO	En evaluación del SEIA
Central Diesel Antofagasta	EDELNOR S.A.	SI	Energía	SI	Dentro	No construido
Mejora al Sistema de Descarga de Riles	CYTEC CHILE Ltda.	SI	Fabril	SI	Dentro	Detenido

ANEXO B
DATANAM

DATANAM

ANAM Y PLATAFORMA DATANAM

ANAM se posiciona como un laboratorio medioambiental líder en el desarrollo de herramientas de gestión de la información, asociados al registro y reportabilidad de datos mediante su plataforma DATANAM. Esta herramienta permite a los clientes (usuarios), un acceso on-line a data histórica, gráficos de tendencia e informes generados por el laboratorio, y la posibilidad de exportar archivos en formatos editables, además de poder realizar el seguimiento del estado de sus muestras.

El cliente, a través de DATANAM, puede disponer de la información en archivos versátiles, tanto para trabajar con sus bases de datos interna, como también exportar a planillas “MS-Excel” u otro formato necesario para reportar a la autoridad. La dualidad “LIMS Labware” y Plataforma DATANAM conjugan la herramienta más potente para la gestión de muestras, análisis, resultados e informes del mercado de servicios de muestreo y análisis de carácter ambiental, totalmente adaptable a los requerimientos del cliente, logrando diseñar desde gráficos simples hasta un completo “dashboard”.

DATANAM Y DATOS POAL

Considerando las características y ventajas de esta herramienta, ANAM implementa una plataforma online donde podrán visualizarse los datos históricos proporcionados por DIRECTEMAR y los nuevos datos de análisis POAL generados en cada una de las bahías a nivel nacional, distinguiendo matriz (agua de mar, sedimento y biota), parámetro, campaña y fecha de muestreo, además de entregar un mapa visual del punto de monitoreo y gráficos de tendencia de cada uno de los parámetros medidos en las distintas bahías (Figura 1 y Figura 2). Estos datos podrán descargarse en distintos formatos (csv, pdf, png, entre otros).

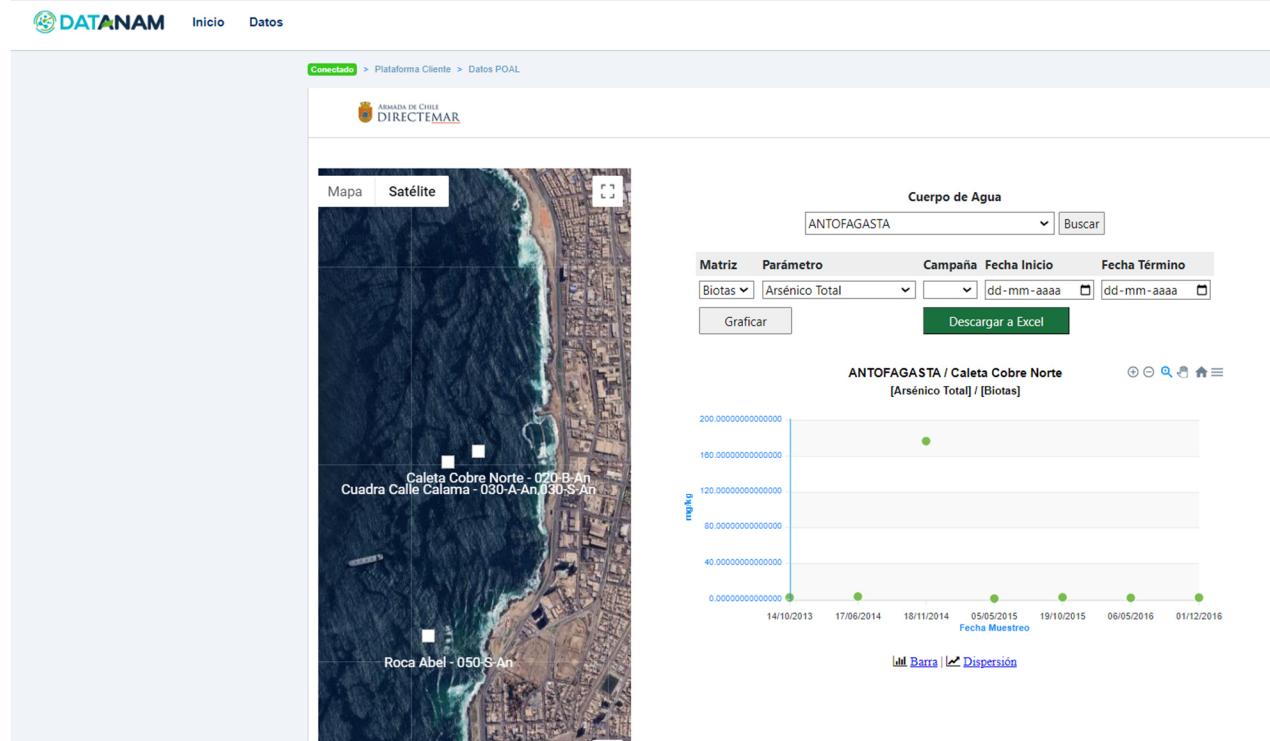


Figura 1: Ejemplo parámetro Arsénico total en la matriz biota de la bahía de Antofagasta, visualizado en la plataforma DATANAM.

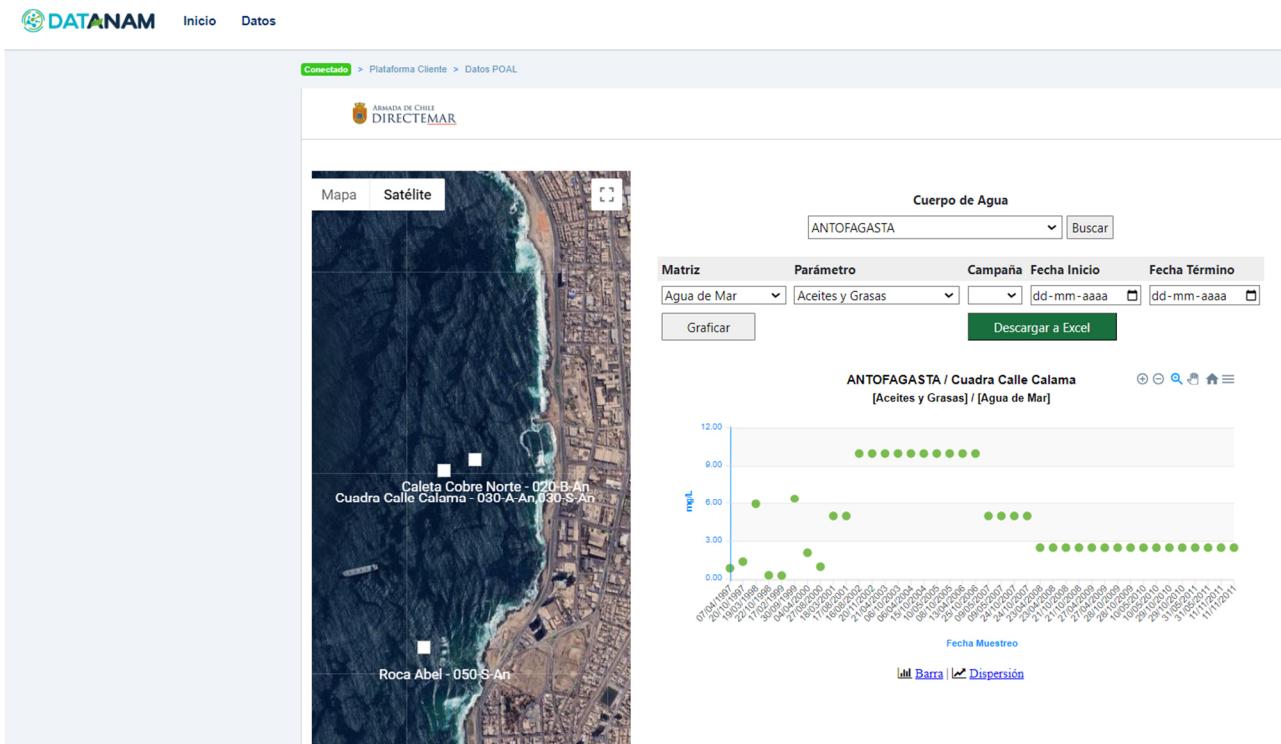


Figura 2: Ejemplo parámetro Aceites y Grasas en la matriz agua de mar de la bahía de Antofagasta, visualizado en la plataforma DATANAM.

ANEXO C

Datos Bahía de Antofagasta