



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO DE EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DE PLAYAS EN AVILÉS

Trabajo realizado por:

Rocío Denise Laurente

Dirigido:

Verónica Cánovas Losada

Raúl Medina Santamaría

Titulación:

**Máster Universitario
en Costas y Puertos**

Santander, mes de septiembre 2025

TRABAJO FIN DE MASTER

ÍNDICE

RESUMEN	14
ABSTRACT	15
1. ANTECEDENTES	18
2. INTRODUCCIÓN	19
2.1 Planteamiento del problema.....	20
2.2 Objetivos	22
Objetivo general.....	22
Objetivos específicos	23
2.3 Información utilizada	23
2.4 Estructura del informe.....	24
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	26
3.1 Descripción general del sistema playa-dunas de Salinas-El Espartal	27
3.2 Descripción batimetría	34
3.3 Características granulométricas.....	36
4. REVISIÓN DE ESTUDIOS PREVIOS. HIPÓTESIS DE PARTIDA	39
4.1 Conclusiones obtenidas del análisis de los estudios previos	39
Modelo de sistema cerrado	39
Modelo de sistema abierto.....	40
Influencia de los dragados en la pérdida de arena del sistema	46
5. ESTUDIO DE DINÁMICA MARINA Y LITORAL	48
5.1 Clima marítimo.....	48
5.1.1 Clima marítimo en aguas abiertas.....	48
Oleaje.....	48
Niveles.....	54
Viento	57
5.1.2 Clima marítimo en la zona de estudio.....	59
Modelado numérico	60
Resultados de la propagación del oleaje	62
5.1.3 Flujos medios de energía.....	67
5.2 Sistema de corrientes	72

6. BALANCE SEDIMENTARIO DE LA PLAYA.....	79
6.1 Evolución de la playa completa.....	80
6.2 Evolución de la playa seca.....	90
6.3 Evolución de la zona del canal.....	94
6.4 Conclusiones respecto al balance sedimentario.....	101
7. EVOLUCIÓN DEL FRENTE DUNAR.....	102
7.1 Evolución del frente dunar con base en imágenes históricas.....	102
7.2 Evolución del frente dunar con base en levantamientos topográficos.....	109
7.2.1 Metodología.....	109
7.2.2 Parámetros morfométricos de la duna.....	110
Pie de duna.....	111
Volumen frontal de la duna	113
7.2.3 Medición de parámetros físicos de las dunas.....	115
7.2.4 Potencial de deriva eólica	124
7.2.5 Relaciones alométricas.....	127
Relación entre el pie de duna y el nivel de agua asociado a un TR=10años.....	127
Relación entre el potencial de deriva eólica y el volumen medio de la duna.....	127
Relación entre el TWL_10y y el volumen de la duna	128
Aporte al volumen total de la zona intermareal	128
Relación del ancho de dunas con el ancho total	129
7.3 Conclusiones respecto a la evolución del frente dunar	130
8. DISCUSIÓN	132
8.1 Sobre el impacto de los dragados en la estabilidad de la playa	132
8.2 Sobre el balance sedimentario y la pérdida de arena del sistema	133
8.3 Sobre la evolución del frente dunar	136
8.4 Sobre el modelo de funcionamiento del sistema.....	142
9. CONCLUSIONES GENERALES.....	142
10. BIBLIOGRAFÍA	143
11. ANEXOS.....	147
12.1 Oleaje	147
Temporales	147
Condiciones medias	151

12.2 Patrones de corrientes.....	156
Temporales.....	156
Condiciones medias	160
12.3 Análisis de los perfiles de dunas: medición de áreas y volúmenes	165
Perfiles 2021-2022.....	165
Perfiles 2022-2023.....	187
Perfiles 2023-2024.....	209

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Captura de noticia. Fuente: La Nueva España, 7 de junio de 2024. "¿Cómo han afectado a la playa de Salinas los dragados del Puerto de Avilés? Los sorprendentes datos de los últimos estudios" Recuperado de: https://www.lne.es/aviles/2024/06/07/han-afectado-playa-salinas-dragados-103455127.html	20
Ilustración 2: Captura de noticia. Fuente: Fuente: Radio Televisión del Principado de Asturias (RTPA). (2021, 17 de noviembre). El dragado del puerto de Avilés no es el único causante de la pérdida de arena en Salinas. Recuperado de https://www.rtpa.es/noticias-asturias:-El-dragado-del-puerto-de-Aviles-no-es-el-unico-causante-de-la-perdida-de-arena-en-Salinas_111637150903.html	21
Ilustración 3: Ubicación de los concejos de Castrillón y Avilés dentro de la Comarca de Avilés. Fuente: Tomado del Ministerio de Justicia (Mapa del Partido Judicial y municipios de su ámbito territorial, 2024).	26
Ilustración 4: Sectorización del espacio costero bajo estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)	27
Ilustración 5: Playa de Bayas. (2016, 17 febrero). El Comercio. https://www.elcomercio.es/asturias/playas/201602/17/playa-bayas-20160217111622.html	28
Ilustración 6: Ubicación de las principales desembocaduras y playas asociadas al aporte de sedimentos del Río Nalón. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)	28
Ilustración 7: Ubicación de las principales desembocaduras y playas asociadas al aporte de sedimentos del Río Nalón. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)	29
Ilustración 8: Zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)	30
Ilustración 9: Limitaciones hacia el este y oeste que confinan la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)	31
Ilustración 10: Limitaciones hacia el este y oeste que limitan la zona de estudio. Fuente: Google Street View.	31
Ilustración 11: Red Natura 2000 código ES1200055 Cabo Busto-Luanco. Superficie: 11.641,87 Ha. Fuente: MITECO (2025). Red Natura 2000 en España [Archivo KMZ]. Banco de Datos de la Naturaleza.	33
Ilustración 12: Red Natura 2000 código ES0000318 Cabo Busto-Luanco. Superficie: 10.042,57 Ha. Fuente: MITECO (2025). Red Natura 2000 en España [Archivo KMZ]. Banco de Datos de la Naturaleza.	33
Ilustración 13: A: Monumento Natural Isla La Deva y el Playón de Bayas. B: Monumento Natural Playa El Espartal. C: Monumento Natural Charca de Zeluán y	

Ensenada de Lloredo. D: Paisaje Protegido Cabo Peñas. Fuente: MITECO (2025). Red Natura 2000 en España [Archivo KMZ]. Banco de Datos de la Naturaleza. _____	34
Ilustración 14: Batimetría general _____	35
Ilustración 15: Topobatimetría del año 2024 (referencia: cero local) – septiembre. Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV. _____	36
Ilustración 16: Perfiles de control empleados en el estudio del CEDEX (2017). Fuente: IHCantabria (2021) _____	37
Ilustración _____	17:
Localización y tamaño de arena medio de las muestras tomadas en la playa Salinas-El Espartal durante la campaña de campo de 1995 (IHCantabria, 1996a). Fuente: IHCantabria (2021) _____	38
Ilustración 18: Mecanismo de transporte según el informe del CEDEX (1994). _____	40
Ilustración 19: Modelo de funcionamiento propuesto por IHCantabria (1996b), bajo condiciones de temporal. _____	40
Ilustración 20: Modelos de funcionamiento de distintos autores. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth _____	43
Ilustración 21: Patrones de corriente – temporal del NW (bajamar). Fuente: IHCantabria (2021) _____	45
Ilustración 22: Patrones de corriente – temporal del WNW (bajamar). Fuente: IHCantabria (2021) _____	45
Ilustración 23: Análisis histórico de dragados en Avilés y San Esteban de Pravia. Fuente: Elaboración propia en base a datos de IHCantabria (2021) y agregado de volúmenes de dragados recientes. _____	46
Ilustración 24: Ubicación de los puntos de descarga de dragados en Avilés y San Esteban de Pravia _____	47
Ilustración 25: Ubicación de los puntos de obtención de datos climáticos _____	49
Ilustración 26: Régimen medio off-shore en el punto GOW. Fuente: Elaboración propia. _____	50
Ilustración 27: Régimen medio off-shore en el punto GOW. Función de distribución acumulativa CDF (izquierda) e histograma (derecha). Fuente: Elaboración propia. _____	50
Ilustración 28: Análisis mensual / estacional del oleaje off-shore _____	51
Ilustración 29: Análisis mensual / estacional del oleaje off-shore. Rosas de oleaje _____	52
Ilustración 30: Mayores hs registradas en cada año de la serie temporal de oleaje. _____	53
Ilustración 31: Análisis de extremos oleaje off-shore (ver ubicación del punto en la Ilustración 25). Ajuste de distribución GEV _____	53
Ilustración 32: Análisis del nivel del mar total _____	55
Ilustración 33: Análisis de la marea meteorológica _____	56
Ilustración 34: Análisis de la marea astronómica _____	57

Ilustración 35: Rosa de vientos (izquierda) y curva de distribución acumulada (derecha)	58
Ilustración 36: Scatter velocidad – dirección del viento.	58
Ilustración 37: Análisis mensual de intensidades de viento	59
Ilustración 38: Mallas propuestas para la propagación del oleaje	61
Ilustración 39: Selección de casos representativos. Primera figura de izquierda a derecha: relación período pico – altura significativa. Segunda figura: relación dirección – altura significativa. Tercera figura: relación dirección – período pico.	61
Ilustración 40: Temporal NW, Hs=5.46m. Tp= 17 segundos. Bajamar	63
Ilustración 41: Condiciones medias NW, Hs=1.59m. Tp= 11 segundos. Bajamar.	64
Ilustración 42: Temporal NE, Hs=2.20m. Tp= 14 segundos. Bajamar	65
Ilustración 43: Condiciones medias NE, Hs=1.04m. Tp= 10 segundos. Bajamar	65
Ilustración 44: Temporal WNW, Hs=3.98m. Tp= 17 segundos. Bajamar	66
Ilustración 45: Condiciones medias WNW, Hs=1.33m. Tp= 11 segundos. Bajamar.	66
Ilustración 46: Comparación de las salidas del modelo para un temporal del WNW, Hs=3.98m. Tp= 17 segundos. Pleamar (imagen izquierda) y Bajamar (imagen derecha).	67
Ilustración 47: Ubicación de puntos objetivo	68
Ilustración 48: Flujo medio de energía en cada punto objetivo. Fuente: Elaboración propia	71
Ilustración 49: Patrones de corrientes generados por los temporales del NE en bajamar. Hs=2.20 Tp=14s, con batimetría de 2024.	73
Ilustración 50: Patrones de corrientes generados por los temporales del NE en bajamar. Hs=2.20 Tp=14s.	73
Ilustración 51: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NE en bajamar. Hs=1.04 Tp=10s.	74
Ilustración 52: Patrones de corrientes generados por los temporales del NW en bajamar. Hs=5.46 Tp=17s.	75
Ilustración 53: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NW en bajamar. Hs=1.59 Tp=11s.	76
Ilustración 54: Patrones de corrientes generados por los temporales del WNW en bajamar. Hs=3.98 Tp=17s.	77
Ilustración 55: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del WNW en bajamar. Hs=1.33 Tp=11s.	78
Ilustración 56: Zonas de control para el análisis de la evolución batimétrica	79
Ilustración 57: Topobatimetría septiembre 2023 y balance sedimentario septiembre 2023- septiembre 2024: Variación de cotas en el conjunto de la playa de Salinas entre septiembre 2023 y septiembre 2024 (Evolución anual). Diferencias de cotas en m.	81

Ilustración 58: Topobatimetría septiembre 2023 y balance sedimentario septiembre 2023- mayo 2024: Variación de cotas en el conjunto de la playa de Salinas entre septiembre 2023 y mayo 2024 (Evolución otoño-invierno). Diferencias de cotas en m.	82
Ilustración 59: Figura 1. Topobatimetría mayo 2024 y balance sedimentario mayo 2024- septiembre 2024: Variación de cotas en el conjunto de la playa de Salinas entre mayo 2024 y septiembre 2024 (Evolución primavera-verano). Diferencias de cotas en m.	83
Ilustración 60: Topobatimetría de la playa. Septiembre 2005.	85
Ilustración 61: Topobatimetría septiembre de 2005 y balance sedimentario 2005-2024: Variación de cotas en el conjunto de la playa de Salinas entre septiembre de 2005 y septiembre de 2024. Diferencias de cotas en m.	87
Ilustración 62: Variación de la playa completa. Período 2023-2024. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	88
Ilustración 63: Variación de la playa completa. Período 2022-2023. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	89
Ilustración 64: Variación de la playa completa. Período 2021-2022. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv.	89
Ilustración 65: Balance sedimentario septiembre 2023-septiembre 2024: Variación de cotas en la playa seca de Salinas entre septiembre de 2023 y agosto de 2024 (Evolución anual). Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv.	91
Ilustración 66: Balance sedimentario septiembre 2023-mayo 2024: Variación de cotas en la playa seca de Salinas entre septiembre de 2023 y mayo de 2024 (Evolución otoño-invierno). Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	93
Ilustración 67: Balance sedimentario mayo 2024-septiembre 2024: Variación de cotas en la playa seca de Salinas entre mayo de 2024 y septiembre de 2024 (Evolución primavera-verano). Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	93
Ilustración 68: Balance sedimentario 2005-2024: Variación de cotas en la playa seca de Salinas entre septiembre de 2005 y septiembre de 2024. Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	94
Ilustración 69. Batimetría del canal de entrada (Septiembre 2023). Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	95
Ilustración 70: Batimetría del canal de entrada (Mayo 2024). Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	95
Ilustración 71: Batimetría del canal de entrada (Junio 2024. Post-dragado). Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	96

Ilustración 72: Batimetría del canal de entrada (Septiembre 2024). Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	96
Ilustración 73: Balance sedimentario septiembre 2023 - mayo 2024: Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto entre septiembre 2023 y mayo 2024. Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	97
Ilustración 74: Balance sedimentario mayo 2024 - campaña 30 de mayo 2024 (predragado): Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto en mayo 2024. Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	98
Ilustración 75: Balance sedimentario mayo-junio 2024: Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto entre mayo y junio de 2024 (pre y post dragado). Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	98
Ilustración 76: Balance sedimentario junio 2024 - septiembre 2024: Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto entre junio 2024 y septiembre 2024. Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	99
Ilustración 77: Balance sedimentario septiembre 2023 - septiembre 2024: Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto entre septiembre 2023 y septiembre 2024. Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	99
Ilustración 78: Zona de dragado 2021.	100
Ilustración 79: Balance sedimentario 2005-2024 en el área de control: Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto entre septiembre de 2005 y septiembre de 2024. Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv	101
Ilustración 80: aplicación de SeaTool para el análisis de las líneas de costa. Fuente: Elaboración propia	103
Ilustración 81: Ubicación de transectos para medición de frente dunar. Fuente: Elaboración propia.	104
Ilustración 82: Tasa de regresión lineal (LRR) en m/año.	105
Ilustración 83: Movimiento neto del frente dunar (NSM) y envolvente de cambio del frente dunar (SCE)	108
Ilustración 84: Sección transversal de cordón dunar y parámetros morfométricos (Almeida et al. 2019).	110
Ilustración 85: Relación entre el nivel del pie de duna y nivel de agua para períodos de retorno de 2 años (izquierda) y 10 años (derecha). Fuente: Pellón et al. (2020).	112
Ilustración 86: Análisis de extremos de niveles. GEV	113

Ilustración 87: Relación entre el volumen de la duna frontal y el período de retorno de 10 años del nivel total de agua (TWL_10y; metros sobre el nivel medio del mar) para: (a) valor medio para cada área de estudio (figura inferior), (b) valor medio para cada sección de línea transversal (figura superior). Fuente: Pellón et. al (2020).	114
Ilustración 88: Perfiles transversales del primer transecto para los años 2023 y 2024.	117
Ilustración 89: Perfiles transversales del transecto N°11 para los años 2023 y 2024.	118
Ilustración 90: Evolución del pie de duna (todos los perfiles). Fuente: Elaboración propia	119
Ilustración 91: Evolución del volumen de dunas. Fuente: Elaboración propia.	120
Ilustración 92: Evolución del frente dunar (perfiles 3-8), con base en el estudio de INDUROT (2017)	120
Ilustración 93: Evolución del volumen de reserva (perfiles con tendencia en alza). Fuente: Elaboración propia	121
Ilustración 94: Evolución del volumen de reserva (perfiles con tendencia a la baja). Fuente: Elaboración propia	121
Ilustración 95: Evolución del volumen de playa. Fuente: Elaboración propia	122
Ilustración 96: Evolución del ancho de playa. Fuente: Elaboración propia	122
Ilustración 97: Evolución del ancho de la duna. Fuente: Elaboración propia	123
Ilustración 98: Evolución de la altura de duna. Fuente: Elaboración propia	123
Ilustración 99: Abanico de direcciones considerado para el cálculo del potencial eólico	125
Ilustración 100: Comparación de la cota del pie de duna actual, con el asociado a un estado de equilibrio.	127
Ilustración 101: Relación entre el potencial de deriva eólica y el volumen medio de la duna	128
Ilustración 102: Relación entre un TWL_10y y el volumen de la duna. Fuente: Pellón et al. (2020)	128
Ilustración 103: Evolución temporal de la distribución volumétrica. Fuente: Elaboración propia.	129
Ilustración 104: Relación entre los volúmenes de dragado y los resultados del balance sedimentario para la playa completa	132
Ilustración 105: Relación entre los volúmenes de dragado y los resultados del balance sedimentario para la playa seca	132
Ilustración 106: Balance sedimentario de la playa completa. Fuente: Elaboración propia	134
Ilustración 107: Balance sedimentario de playa seca. Fuente: Elaboración propia	135

Ilustración 108: Variación de parámetros físicos de la duna. Período 2021-2022	137
Ilustración 109: Variación de parámetros físicos de la duna. Período 2022-2023	138
Ilustración 110: Variación de parámetros físicos de la duna. Período 2023-2024	139
Ilustración 111: Tendencia de evolución de la línea de costa – perfiles 1 a 10 (eje x: años)	140
Ilustración 112: Tendencia de evolución de la línea de costa – perfiles 11 a 15 y 18 a 22 (eje x: años)	141
Ilustración 113: Temporal NW, Hs=5.46m. Tp= 17 segundos. Pleamar	147
Ilustración 114: Temporal NE, Hs=2.20m. Tp= 14 segundos. Pleamar	148
Ilustración 115: Temporal NNW, Hs=5.72m. Tp= 18 segundos. Bajamar	148
Ilustración 116: Temporal NNW, Hs=5.72m. Tp= 18 segundos. Pleamar	148
Ilustración 117: Temporal NNE, Hs=3.33m. Tp= 14 segundos. Bajamar	149
Ilustración 118: Temporal NNE, Hs=3.33m. Tp= 14 segundos. Pleamar	149
Ilustración 119: Temporal N, Hs=3.94m. Tp= 17 segundos. Bajamar	150
Ilustración 120: Temporal N, Hs=3.94m. Tp= 17 segundos. Pleamar	150
Ilustración 121: Temporal WNW, Hs=3.98m. Tp= 17 segundos. Pleamar	151
Ilustración 122: Condiciones medias NE, Hs=1.04m. Tp= 10 segundos. Pleamar	151
Ilustración 123: Condiciones medias NNE, Hs=1.0m. Tp= 10 segundos. Bajamar	152
Ilustración 124: Condiciones medias NNE, Hs=1.0m. Tp= 10 segundos. Pleamar	152
Ilustración 125: Condiciones medias N, Hs=1.12m. Tp= 11 segundos. Bajamar	153
Ilustración 126: Condiciones medias N, Hs=1.12m. Tp= 11 segundos. Pleamar	153
Ilustración 127: Condiciones medias NNW, Hs=1.41m. Tp= 11 segundos. Bajamar	154
Ilustración 128: Condiciones medias NNW, Hs=1.41m. Tp= 11 segundos. Pleamar	154
Ilustración 129: Condiciones medias WNW, Hs=1.33m. Tp= 11 segundos. Pleamar	155
Ilustración 130: Condiciones medias NW, Hs=1.59m. Tp= 11 segundos. Pleamar.	155
Ilustración 131: Patrones de corrientes generados por los temporales del NE en pleamar. Hs=2.20 Tp=14s.	156
Ilustración 132: Patrones de corrientes generados por los temporales del NNE en bajamar. Hs=3.33 Tp=14s.	156
Ilustración 133: Patrones de corrientes generados por los temporales del NNE en pleamar. Hs=3.33 Tp=14s.	157
Ilustración 134: Patrones de corrientes generados por los temporales del N en bajamar. Hs=3.94 Tp=12s.	157

Ilustración 135: Patrones de corrientes generados por los temporales del N en pleamar. Hs=3.94 Tp=12s. _____	158
Ilustración 136: Patrones de corrientes generados por los temporales del NNW en bajamar. Hs=5.72 Tp=18s. _____	158
Ilustración 137: Patrones de corrientes generados por los temporales del NNW en pleamar. Hs=5.72 Tp=18s. _____	159
Ilustración 138: Patrones de corrientes generados por los temporales del NW en pleamar. Hs=5.46 Tp=17s. _____	159
Ilustración 139: Patrones de corrientes generados por los temporales del WNW en pleamar. Hs=3.98 Tp=17s. _____	160
Ilustración 140: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NE en pleamar. Hs=1.04 Tp=10s. _____	160
Ilustración 141: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NNE en pleamar. Hs=1 Tp=10s. _____	161
Ilustración 142: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NNE en bajamar. Hs=1 Tp=10s. _____	161
Ilustración 143: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del N en bajamar. Hs=1.12 Tp=11s. _____	162
Ilustración 144: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del N en pleamar. Hs=1.12 Tp=11s. _____	162
Ilustración 145: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NNW en pleamar. Hs=1.41 Tp=11s. _____	163
Ilustración 146: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NNW en bajamar. Hs=1.41 Tp=11s. _____	163
Ilustración 147: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NW en pleamar. Hs=1.59 Tp=11s. _____	164
Ilustración 148: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del WNW en pleamar. Hs=1.33 Tp=11s. _____	164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Granulometría realizada por el CEDEX (mayo 2016). Fuente: IHCantabria (2021)	36
Tabla 2: Granulometría realizada por el CEDEX (diciembre 2001). Fuente: IHCantabria (2021)	38
Tabla 3: Diámetros nominales del material empleado para la regeneración de playa realizada en 2004/2005. Fuente: IHCantabria (2021)	38
Tabla 4: Comparación de modelos de funcionamiento	42
Tabla 5: Mayores Hs registradas en cada año de la serie temporal de oleaje.	52
Tabla 6: Análisis de extremos – oleaje off-shore.	54
Tabla 7: Características de las mallas propuestas	61
Tabla 8: Características de oleajes representativos de las condiciones medias y extremas off-shore.	62
Tabla 9: Valores del Flujo medio de energía en cada punto objetivo y su dirección.	70
Tabla 10: Batimetrías antecedentes disponibles	80
Tabla 11: Levantamientos utilizados para analizar la evolución batimétrica anual	80
Tabla 12. Resumen del balance sedimentario en la playa completa en el periodo 2023-2024.	84
Tabla 13. Balance sedimentario histórico (playa completa).	87
Tabla 14. Resumen del balance sedimentario en la playa seca en el periodo 2023-2024.	90
Tabla 15. Balance sedimentario histórico (playa seca).	92
Tabla 16. Resumen del balance sedimentario en el canal de acceso al Puerto en el periodo 2023-2024 (septiembre 2023-septiembre 2024)).	97
Tabla 17. Balance histórico del canal de acceso al Puerto en el área de control propuesta por el CEDEX.	100
Tabla 18: Resultados del análisis de la evolución del frente dunar.	107
Tabla 19: Niveles de marea para distintos períodos de retorno.	113
Tabla 20: Relaciones alométricas propuestas por Almeida et al. (2019) corregida.	115
Tabla 21: Cotas de pie de duna definidas para cada perfil, para cada año.	116



RESUMEN

En las últimas décadas se ha observado una pérdida de arena del sistema playa-dunas de Salinas-El Espartal. Este hecho ha sido estudiado por diversos autores (p.ej. Flor-Blanco et al., 2013; Flor-Blanco et al., 2013; INDUROT, 1999; CEDEX, 2010b) con el fin de vislumbrar la causa de dicha pérdida de arena.

En todos ellos se hace referencia a que la evolución del sistema playa-dunas de Salinas-El Espartal ha estado siempre ligada a las dinámicas actuantes en la zona (p.ej. Los temporales de oleaje de febrero y marzo de 2014) y las intervenciones humanas realizadas en el estuario de Avilés, la desembocadura y en las dunas para el desarrollo del Puerto de Avilés y la expansión urbanística de la zona.

En este sentido, varios autores apuntan a los dragados efectuados para garantizar la operatividad del Puerto de Avilés como la causa principal de la pérdida de arena. Por este motivo, cuando en 2018 la Autoridad Portuaria de Avilés (APAv) solicitó al actual Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) la autorización para la ejecución del proyecto “Dragado de Mantenimiento en el puerto de Avilés para cuatro años”, la Dirección General de Biodiversidad y Calidad Ambiental del MITECO formuló declaración de impacto ambiental (DIA, véase BOE-A-2018-9755) favorable del Proyecto, condicionado al cumplimiento de una serie de requerimientos.

Dentro de estos requerimientos están la realización de un programa de vigilancia ambiental (Tarea E en BOE-A-2018-9755) cuyo objetivo es garantizar el cumplimiento de la totalidad de las medidas preventivas y correctoras que contiene el Proyecto.

En particular, dentro de esta tarea se incluye el análisis de evolución el sistema playa-dunas de Salinas-El Espartal y la posible afección de las actuaciones previstas en este sistema, dado que es uno de los Espacios Protegidos de la Red Natura 2000 (Monumento Natural de la Playa del Espartal y Zona Especial del Conservación ZEC ES1200055).

Dado que la Autoridad Portuaria de Avilés no había ejecutado ningún dragado hasta 2021, sólo había dado respuesta a la evolución prevista del Sistema con base en los dragados históricos mediante la presentación del informe “T4 Estudio de evolución del sistema playa-dunas para dar respuesta al punto 4.4 de la DIA”, desarrollado por IHCantabria en 2021 en el marco de este proyecto. En dicho estudio, se llegó a la conclusión que era un sistema abierto y no se podía establecer una relación biunívoca entre los dragados locales y la evolución de las dunas.

En el presente trabajo, ya con la información sobre los dragados ejecutados y los levantamientos topo-batimétricos realizados por la APAv, se pretendió dar respuesta a los planteos de la DIA, analizando los posibles efectos de estas obras de profundización. Para esto, se ha realizado un estudio topobatimétrico de la playa sumergida, emergida y frente dunar, para evaluar las pérdidas o ganancias de arena del sistema de la playa y dunas de Salinas-El Espartal el periodo anual 2023- 2024 (puntos E.4.1 de la DIA), y un análisis del frente dunar con base en imágenes en el periodo anual 2023- 2024 (punto E.4.2 de la DIA), y también en base al levantamiento topográfico de las dunas.



A lo largo del análisis sobre el sistema de playas-dunas en Avilés, se ha evidenciado una evolución compleja y dinámica que no puede explicarse únicamente por la actividad humana como los dragados, dado que los datos muestran que los balances sedimentarios han fluctuado con independencia de estas intervenciones.

En los últimos años, especialmente a partir de 2021, se ha observado una tendencia de la playa entera (entendiéndose como tal el área definida en los estudios antecedentes del CEDEX) hacia la acumulación de sedimentos. El balance sedimentario resultó positivo en los tres períodos analizados (92.003 m³ en el último año 2023-2024), habiéndose realizado obras de dragado en dos de los tres períodos. Por otra parte, el balance 2005-2024 también arroja un balance positivo por un valor de 926.751 m³. Esto evidencia la capacidad del sistema para mantener su stock sedimentario a través de aportes externos, confirmando su naturaleza de sistema abierto.

El retroceso sistemático del frente dunar en los sectores centrales contrasta aparentemente con el balance sedimentario positivo general, lo que indica una redistribución espacial compleja del sedimento desde la zona intermareal hacia el perfil sumergido. En particular, el período más reciente destaca por un crecimiento en la altura y el ancho de las dunas. Este comportamiento refuerza la idea de que el sistema funciona como un sistema abierto, capaz de captar sedimentos desde zonas externas.

ABSTRACT

In recent decades, a loss of sand from the Salinas–El Espartal beach–dune system has been observed. This phenomenon has been studied by various authors (e.g., Flor-Blanco et al., 2013; Flor-Blanco et al., 2013; INDUROT, 1999; CEDEX, 2010b) in order to shed light on the causes of this sand loss.

All of these studies refer to the fact that the evolution of the Salinas–El Espartal beach–dune system has always been linked to the dynamics acting in the area (e.g., the wave storms of February and March 2014) and to human interventions carried out in the Avilés estuary, its mouth, and the dunes for the development of the Port of Avilés and the urban expansion of the area.

In this sense, several authors point to the dredging operations carried out to ensure the operability of the Port of Avilés as the main cause of the sand loss. For this reason, when in 2018 the Avilés Port Authority (APAv) requested authorization from the current Ministry for Ecological Transition and the Demographic Challenge (MITECO) to execute the project “Maintenance Dredging in the Port of Avilés for Four Years,” the Directorate General for Biodiversity and Environmental Quality of MITECO issued a favorable Environmental Impact Statement (EIS, see BOE-A-2018-9755) for the project, conditioned on compliance with a series of requirements.

Among these requirements is the implementation of an environmental monitoring program (Task E in BOE-A-2018-9755), whose objective is to ensure compliance with all the preventive and corrective measures included in the project. In particular, within this task is included the analysis of the evolution of the Salinas–El Espartal beach–dune system and the possible impacts of the planned actions on this system, given that it is one of the Protected Areas of the Natura 2000 Network (Natural Monument of El Espartal Beach and Special Conservation Area ES1200055).

Since the Avilés Port Authority had not carried out any dredging until 2021, it had only responded to the expected evolution of the system based on historical dredging through the presentation of the report “T4 Study on the Evolution of the Beach–Dune System to Respond to Point 4.4 of the EIS,” developed by IHCantabria in 2021 within the framework of this project. This study concluded that it was an open system and that no one-to-one relationship could be established between local dredging activities and the evolution of the dunes.

In the present work, now with information on the dredging carried out and the topographic–bathymetric surveys performed by the APAv, an attempt was made to address the issues raised by the EIS by analyzing the possible effects of these deepening works. For this purpose, a topobathymetric study of the submerged and emerged beach and dune front was carried out to evaluate the losses or gains of sand in the Salinas–El Espartal beach–dune system during the annual period 2023–2024 (point E.4.1 of the EIS), as well as an analysis of the dune front based on images from the annual period 2023–2024 (point E.4.2 of the EIS), and also based on the topographic survey of the dunes.

Throughout the analysis of the beach–dune system in Avilés, a complex and dynamic evolution has been evidenced that cannot be explained solely by human activities such as dredging, since the data show that sediment budgets have fluctuated independently of these interventions.



In recent years, especially since 2021, the entire beach (understood as the area defined in the previous CEDEX studies) has shown a trend toward sediment accumulation. The sediment budget was positive in the three periods analyzed (92,003 m³ in the last year 2023–2024), with dredging works carried out in two of the three periods. Furthermore, the 2005–2024 balance also yields a positive value of 926,751 m³. This demonstrates the system's capacity to maintain its sediment stock through external inputs, confirming its nature as an open system.

The systematic retreat of the dune front in the central sectors contrasts with the apparently positive overall sediment budget, indicating a complex spatial redistribution of sediment from the intertidal zone to the submerged profile. In particular, the most recent period stands out for an increase in dune height and width. This behavior reinforces the idea that the system functions as an open system capable of capturing sediment from external areas.



1. ANTECEDENTES

El presente documento forma parte del Trabajo de Fin de Máster, como condición para finalizar el Máster en Costas y Puertos de la Universidad de Cantabria, curso 2024-2025. Ha sido realizado por Rocío Denise Laurente bajo la supervisión de Verónica Cánovas Losada y Raúl Medina Santamaría.

Para el desarrollo del trabajo, se ha utilizado información de la Autoridad Portuaria de Avilés, de estudios previos y de clima marítimo aportada por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria) para la realización de este estudio.

Este documento constituye la presentación escrita del “ESTUDIO DE EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DE PLAYAS EN AVILÉS”, en el que se describen la problemática abordada, los objetivos establecidos, las metodologías aplicadas para obtener los resultados, y las conclusiones derivadas.

2. INTRODUCCIÓN

El sistema de playas Salinas–El Espartal, situado en el concejo de Castrillón (Asturias), constituye uno de los sectores costeros más emblemáticos del litoral cantábrico, tanto por su gran extensión de arena dorada como por su relevancia ecológica, paisajística y socioeconómica.

Este sistema alberga hábitats dunares de alto valor ambiental, actúa como barrera natural de protección frente a temporales y es un recurso clave para el ocio, el turismo y las actividades deportivas de la región.

La configuración geomorfológica actual de la playa es fruto de la interacción compleja entre procesos hidrodinámicos (oleaje, mareas y corrientes litorales), procesos eólicos y la intensa presión antrópica (infraestructuras, usos recreativos y dragados) que, a lo largo de décadas, han modelado su morfología.

Entre las actuaciones humanas más influyentes destacan la construcción del espigón de protección y las sucesivas obras de dragado en el estuario de Avilés, que varios autores consideran la razón principal de la pérdida de arena del sistema (Flor et.al. 2009,2011, 2013). En este contexto, la Autoridad Portuaria de Avilés (APAv), en cumplimiento de los requerimientos de los organismos de control y de los compromisos ambientales derivados de sus actuaciones, mantiene desde hace años un programa sistemático de seguimiento morfológico de la playa.

Dicho programa, que incluye levantamientos topo-batimétricos periódicos y análisis de imágenes aéreas, permite documentar con detalle la evolución temporal del sistema y evaluar los efectos de las actuaciones portuarias y de los temporales sobre su estabilidad.

La información obtenida mediante este seguimiento constituye la base fundamental del presente estudio, cuyo objetivo principal es analizar la evolución del sistema playa-dunas, con especial énfasis en los efectos derivados de las actividades de dragado. Este análisis responde a los requerimientos establecidos en la Declaración de Impacto Ambiental (DIA, Resolución de 26 de junio de 2018, publicada en el BOE-A-2018-9755), que autorizó la ejecución de las obras de profundización. Dicha autorización está supeditada a evaluar anualmente, las pérdidas o ganancias sedimentarias del sistema y a monitorear la morfología del frente dunar, con el fin de evaluar si existen impactos de las obras de dragado sobre el sistema playa-dunas. El presente estudio tiene el objetivo de dar respuesta a estas cuestiones, relacionando ambos análisis con las operaciones de dragado realizadas, con el fin de responder a las siguientes preguntas: ¿Existe realmente una pérdida de arena en el sistema?. ¿Funciona como un sistema abierto (con intercambio de arena con el exterior) o cómo un sistema cerrado? ¿Las obras de dragado generan un impacto en el sistema?

2.1 Planteamiento del problema

De acuerdo a diferentes autores, la playa de Avilés ha experimentado en las últimas décadas una pérdida progresiva de arena. Estudios previos han identificado las actividades de dragado del canal de acceso al puerto como una de las posibles causas de este fenómeno, debido a su potencial interferencia con la dinámica sedimentaria natural de la zona.

Esta problemática ha motivado diversas actuaciones de protección costera por parte de la Dirección General de la Costa y el Mar (DGCyM), así como la imposición a la Autoridad Portuaria de Avilés (APAV) de la obligación de realizar un monitoreo continuo de la zona.

Dicha exigencia de seguimiento se estableció como condición específica en la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) formulada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico en 2018, que otorgó la declaración favorable para el proyecto "Dragado de Mantenimiento en el puerto de Avilés para cuatro años" (BOE-A-2018-9755). La DIA reconoció la necesidad de verificar la relación entre las operaciones de dragado y los procesos erosivos en el sistema playa-dunas.

+ ¿Como han afectado a la playa de Salinas los dragados del Puerto de Avilés? Los sorprendentes datos de los últimos estudios

El actual dragado es el último con la vigente Declaración de Impacto Ambiental que obliga a tratar los sedimentos para devolverlos al arenal



La cinta de la draga «SR 11», en la que se acumulan los sedimentos retirados del fondo de la bocana y el canal de entrada al Puerto. | María Vilamuzo

Ilustración 1: Captura de noticia. Fuente: La Nueva España, 7 de junio de 2024. "¿Cómo han afectado a la playa de Salinas los dragados del Puerto de Avilés? Los sorprendentes datos de los últimos estudios" Recuperado de: <https://www.lne.es/aviles/2024/06/07/han-afectado-playa-salinas-dragados-103455127.html>

Fuente: RTPA, 17 de noviembre. 2021 @ 19:28

El dragado del puerto de Avilés no es el único causante de la pérdida de arena en Salinas

N'asturianu: El dragáu del cai d'Avilés nun ye l'únicu causante de la pérdida d'arena en Salinas ➔



Informe de los expertos del Cedex y de las universidades de Oviedo y Cantabria

Ilustración 2: Captura de noticia. Fuente: Fuente: Radio Televisión del Principado de Asturias (RTPA). (2021, 17 de noviembre). El dragado del puerto de Avilés no es el único causante de la pérdida de arena en Salinas. Recuperado de https://www.rtpa.es/noticias-asturias:-El-dragado-del-puerto-de-Aviles-no-es-el-unico-causante-de-la-perdida-de-arena-en-Salinas_111637150903.html

Intentar explicar esta pérdida de arena, así como entender el funcionamiento actual del sistema y los factores que influyen en los complejos procesos morfológicos, ha sido objeto de estudio de diversos autores: Flor-Blanco et al. (2009, 2011, 2013); Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio de la Universidad de Oviedo (INDUROT, 1997, 2017); Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, 1994, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015, 2017); e IHCantabria (1996a, 1996b, 2020, 2021).

A grandes rasgos, estos autores identificaron como posibles causas de la pérdida de arena los siguientes:

- Los temporales de oleaje más energéticos, en particular los registrados en febrero y marzo de 2014, que han provocado retrocesos significativos de la línea de costa, afectando a la estabilidad del paseo marítimo y erosionando sectores amplios de la duna.

- La antropización de la zona identificado como un factor clave que explica el comportamiento actual del sistema, tanto la urbanización (zona oeste), como la construcción (al este) del Puerto de Avilés, que modificó el estuario que lleva el mismo nombre.
- Actuaciones sobre la ría de Avilés que modificaron su morfodinámica, su desembocadura y su relación con el sistema de playas-dunas, como rellenos de marismas, encauzamiento de la ría y dragados.

Otra cuestión clave investigada por estos autores a la hora de justificar la influencia de dichas causas reside en la hipótesis de partida sobre el balance global de la ensenada de Avilés. En este sentido, se manejan dos enfoques principales: (i) considerar la ensenada como un sistema cerrado sin intercambios con áreas adyacentes; o (ii) interpretarla como un sistema abierto que recibe arena del Nalón y la transporta hacia Xagó. Identificar cuál de estos modelos se ajusta mejor a la realidad es el primer paso para entender los cambios que se producen en el balance sedimentario del área de estudio.

Estudios anteriores realizados por el CEDEX (1994) concluyeron que el modelo morfodinámico de funcionamiento del sistema es un sistema cerrado, en el que el estuario actúa como un receptor que sólo recibe arena del exterior, producto de un flujo sedimentario hacia la canal que se produce por dos mecanismos: corrientes de gradientes de sobreelevación y transporte normal.

Por otro lado, estudios previos realizados por el IHCantabria (2021) han identificado procesos complejos de redistribución sedimentaria que evidencian el funcionamiento de la playa como un sistema abierto, importando arena de la zona de San Esteban de Pravia y exportando arena al exterior. Esto implica que la evolución futura del sistema depende de la cantidad de arena que llegue, del clima marítimo existente y de los cambios en el balance sedimentario del sector situado al Oeste de la playa.

En este contexto, en el presente trabajo se busca analizar la evolución reciente del sistema playa-dunas de Salinas-El Espartal (2021-2024), con base en datos actuales, complementando dicho análisis con datos históricos (2001 a 2019 con períodos discontinuos), con el fin de dar respuesta a las inquietudes de la DIA del proyecto y establecer la relación entre los patrones de comportamiento observados y las obras de dragado ejecutadas.

2.2 Objetivos

Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es analizar los posibles efectos del dragado ejecutado por la APAV en el sistema playa-dunas para dar respuesta los puntos E.4.1, E.4.2. de la DIA por la cual se autorizaron las obras.

En particular, se realizarán las siguientes tareas

- Estudio topobatimétrico de la playa sumergida, emergida y frente dunar, para evaluar las pérdidas o ganancias de arena del sistema de la playa y dunas de Salinas-El Espartal el periodo anual 2023- 2024 (puntos E.4.1 de la DIA).

- Análisis del frente dunar con base en imágenes en el periodo anual 2023- 2024 (punto E.4.2 de la DIA).

Objetivos específicos

- **OE1. Conocer el modelo de funcionamiento del sistema playa-dunas:** Se realizará una revisión bibliográfica de los modelos de funcionamiento propuesto por distintos autores, a fin de relacionar los patrones de evolución observados con los esquemas de funcionamiento propuestos, y así, determinar cuál se ajusta mejor a la realidad.
- **OE2. Analizar la evolución histórica de la playa** a través de la realización de balances sedimentarios en base a los últimos levantamientos disponibles, y a balances históricos, con el fin de determinar si hay efectivamente una pérdida de arena de la playa.
- **OE3: Analizar la evolución histórica del frente dunar** a través del estudio de las líneas históricas del frente (obtenidas mediante imágenes), y midiendo parámetros morfológicos de la duna a través de la realización de perfiles en base a levantamientos topográficos de los años 2021 a 2024. Esto, para determinar si hay efectivamente una pérdida de arena de las dunas.
- **OE4. Analizar si las obras de dragado generan un impacto en la estabilidad de la playa,** relacionándolas con los resultados de los objetivos 2 y 3.

2.3 Información utilizada

El sistema de playas de Salinas – El Espartal ha sido ampliamente estudiado, por su importancia como sistema dentro de Asturias y por las problemáticas que se han descrito en los puntos anteriores. La Autoridad Portuaria de Avilés (APAV) viene realizando levamientos de control de la zona, y dicha información supone un recurso valioso para el seguimiento de la evolución del sistema de playas. Asimismo, diversos autores han publicado artículos sobre la zona de estudio describiendo su funcionamiento. Finalmente, mencionar que la principal fuente de datos han sido los estudios desarrollados por el IHCantabria a petición de la APAV.

A continuación, se listan los principales documentos de referencia e información empleada en este estudio:

- Contrato de Investigación para el análisis de las muestras de caracterización granulométrica y química de los sedimentos a dragar en el Puerto de Avilés y trabajos para dar respuesta a la DIA del proyecto de Dragado de Mantenimiento en el Puerto de Avilés:
 - a) Estudio de evolución del sistema playa – dunas para dar respuesta al punto 4.4 de la DIA. (2021).
 - b) Estudio topobatimétrico de la playa e informe anual de pérdidas y ganancias de sedimento y vegetación dunar. Tareas 2 y 3: período 2021-2022. (2024)
 - c) Estudio topobatimétrico de la playa e informe anual de pérdidas y ganancias de sedimento y vegetación dunar. Tareas 2 y 3: período 2022-2023. (2024)



- Fotografías aéreas históricas procedentes de Google Earth, Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Topo-batimetrías de la playa sumergida, emergida y del frente dunar de los años 2021, 2022, 2023 y 2024, aportadas por la APAv.
- Topo-batimetrías de la playa sumergida y emergida y de algunos sectores de la playa seca (algunos no llegan hasta las dunas) de los años 2001, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016 y 2019.
- Ortofotografías de la zona de estudio georreferenciadas y fotografías aéreas de playa y dunas correspondientes a los años 2022, 2023 y 2024, aportadas por la APAv.
- Información sobre los dragados llevados a cabo en diferentes ocasiones, el último entre mayo y junio de 2024 aportada por la APAv.
- Trabajo de Fin de Máster “Estudio del efecto de la prolongación del dique de la ría de Avilés en la estabilidad de la playa” de Gabriel Bellido Prieto (2023).

2.4 Estructura del informe

El informe se estructura de la siguiente manera:

- Capítulo 1. Antecedentes: Se describen los antecedentes administrativos que han motivado el presente estudio.
- Capítulo 2. Introducción: Se presenta la problemática y los objetivos del presente trabajo, así como los datos utilizados y el contenido del mismo
- Capítulo 3: Descripción de la zona de estudio. Se realiza una descripción de la zona de estudio, tanto a nivel regional como local, destacando aspectos como la morfología general, configuración batimétrica local y granulometría.
- Capítulo 4: Revisión de estudios previos. Hipótesis de partida: Se revisan las conclusiones de los estudios previos sobre los modelos de funcionamiento del sistema playa –dunas y sobre la influencia de los dragados en la pérdida de arena del sistema.
- Capítulo 5: Estudio de dinámica marina y litoral. Se realiza una descripción de la dinámica marina (oleaje, niveles, vientos), tanto del clima off-shore como su propagación hasta la playa, en condiciones medias y de temporal. Se describe además la dinámica litoral, y se analiza el modelo de comportamiento con base en estudios previos y a los resultados del estudio de dinámica litoral.
- Capítulo 6: Balance sedimentario de la playa. Se analizan los balances sedimentarios, realizados con base en los levamientos disponibles para este estudio, y se incluyen balances realizados en estudios antecedentes de períodos previos, para analizar las ganancias y pérdidas del sistema a lo largo del tiempo.
- Capítulo 7: Evolución del frente dunar. Se estudia la evolución del frente dunar, con base en los levamientos topográficos de los años 2021, 2022, 2023 y 2024 con el fin de conocer el estado actual de las dunas de El Espartal. Se



compara además el estado actual con el de otras dunas cercanas consideradas en equilibrio por su bajo grado de antropización.

- Capítulo 8: Discusión: Se trata de incorporar una mirada englobadora de todos los aspectos analizados: dinámica marina y litoral, balance sedimentario, evolución del frente dunar, para responder a los ejes principales del estudio: Impacto de los dragados en la estabilidad de la playa, pérdidas o ganancias de arena del sistema, y modelo de comportamiento que mejor se ajusta.
- Capítulo 9: Conclusiones generales. Se incorporan conclusiones generales en base al análisis realizado en el punto anterior.
- Capítulo 10: Bibliografía. Se recopila la bibliografía utilizada para el desarrollo del trabajo de fin de máster.
- Capítulo 11: Se adjuntan los anexos correspondientes, como apoyo técnico y gráfico al desarrollo del documento: patrones de oleaje y corrientes en condiciones medias y extremas, y análisis de los perfiles de duna.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El sistema litoral Salinas - El Espartal está situado en el concejo de Castrillón, perteneciente a la Comarca de Avilés, en la costa centro-occidental de Asturias (España).

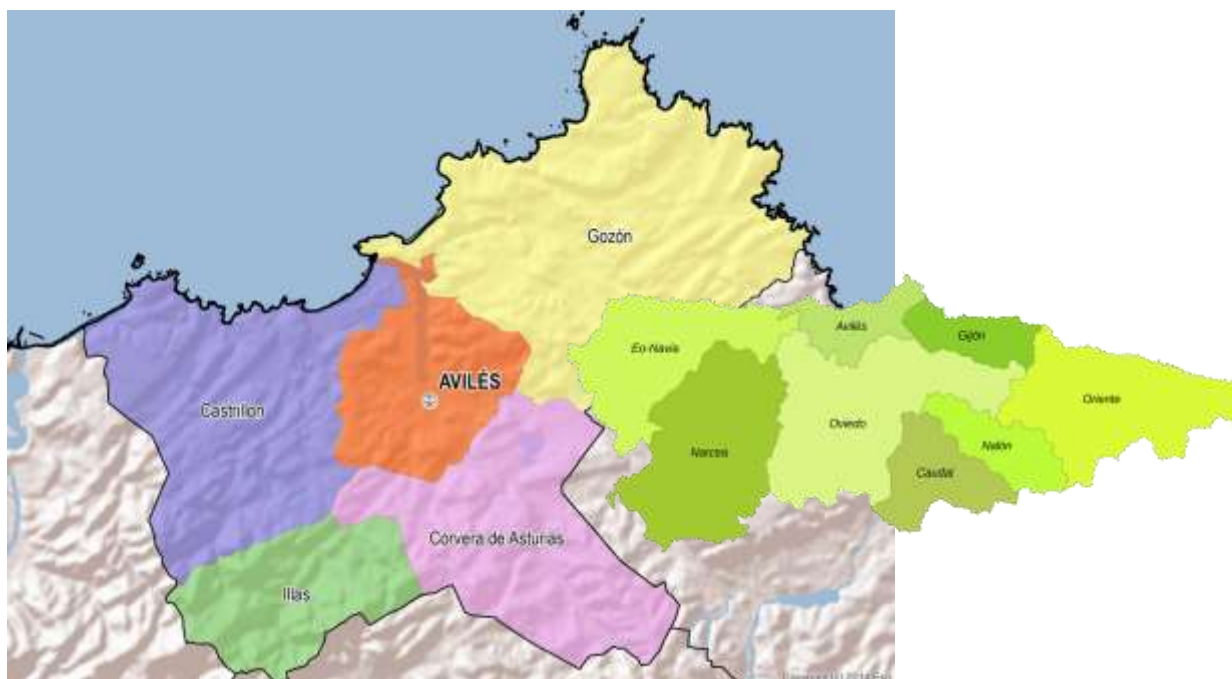


Ilustración 3: Ubicación de los concejos de Castrillón y Avilés dentro de la Comarca de Avilés.

Fuente: Tomado del Ministerio de Justicia (Mapa del Partido Judicial y municipios de su ámbito territorial, 2024).

Este espacio costero abarca:

- Playa de Salinas: más urbana y frecuentada, con infraestructuras turísticas. (A en la figura siguiente).
- Playa de El Espartal: de carácter más natural, colindante con el sistema dunar. (B en la figura siguiente).
- Sistema dunar de El Espartal: el mayor campo de dunas fósiles de Asturias. (C en la figura siguiente).



Ilustración 4: Sectorización del espacio costero bajo estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)

3.1 Descripción general del sistema playa-dunas de Salinas-El Espartal

La zona de estudio no se restringe únicamente al sistema playa-duna de Salinas-El Espartal, sino que mantiene una estrecha vinculación con áreas colindantes, conformando un entorno costero interrelacionado que trasciende los límites estrictos de la playa.

En este sentido, es importante realizar una descripción general de la costa asturiana y en particular de los sectores adyacentes a la zona de estudio.

Ilustración 6. A lo largo de toda la costa asturiana se distribuyen los diferentes elementos: tramos acantilados, playas y campos dunares, rías y estuarios y la rasa, todas estas unidades presentan algunas diferencias desde el extremo occidental al oriental de la región. Las diferencias mayores se distribuyen de acuerdo con las subregiones existentes en el sustrato geológico.

En el occidente, las rasas y acantilados se excavan sobre rocas silíceas, frecuentemente cuarcitas que dan fuertes relieves. En la zona centro-oriental de la región, la costa es en general más baja, con acantilados más inestables y amplios depósitos arenosos.

En las rasas orientales, talladas sobre rocas calcáreas carboníferas, existe un interesante modelado kárstico parcialmente inundado por el mar, con numerosos fenómenos mixtos, como las cuevas marinas, los bufones o las playas interiores en dolinas.

Para todo el litoral, se destaca la presencia de numerosos elementos de importancia singular, donde se incluyen algunas rías y estuarios, sistemas de playas y dunas, y algunos acantilados.



Ilustración 5: Playa de Bayas. (2016, 17 febrero). El Comercio.
<https://www.elcomercio.es/asturias/playas/201602/17/playa-bayas-20160217111622.html>

Los ríos son los principales aportadores de arenas a la costa, las cuales son transportadas aguas abajo hasta la desembocadura. El Principado de Asturias posee la mayor línea de costa entre las provincias cantábricas y alberga el mayor número de desembocaduras fluviales, un total de 41 ríos de los que más de la mitad no superan las 16 ha de superficie estuarina. En este contexto, se han identificado 8 masas principales de agua de transición (Eo, Navia, Esva, Nalón, Avilés, Villaviciosa, Ribadesella y Tina Mayor).



Ilustración 6: Ubicación de las principales desembocaduras y playas asociadas al aporte de sedimentos del Río Nalón. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)



Ilustración 7: Ubicación de las principales desembocaduras y playas asociadas al aporte de sedimentos del Río Nalón. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)

Como se describe en el estudio sobre las dunas de Bayas (Diego Cavada, 2014), el sistema fluvial del Nalón forma parte de los ríos que desembocan en la costa Cantábrica, tratándose del mayor río cordillerano de la cordillera Cantábrica con 138 km de longitud y una cuenca hidrográfica vertiente al estuario del Nalón de 3.692 km². El curso inferior del Nalón, de acuerdo con los datos obtenidos de las estaciones de aforo de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, obtenidos de la estación de aforo de Grado (1346), tiene un caudal absoluto medio anual de 55,18 m³/s, con variaciones muy extremas entre avenidas y periodos de estiaje, y máximos y mínimos anuales de 84,53 m³/s y 31,24 m³/s, respectivamente. Las longitudes de los ejes fluviales que concurren al estuario nunca sobrepasan los 15 km, y las cuencas hidrográficas, de escasa superficie, suponen un total de 184 km², por lo que la aportación de agua dulce es baja, estimándose en 249.3 hm³/año para el caudal fluvial, frente a un caudal mareal medio calculado de 3423.5 hm³/año, tratándose de un estuario de mezcla total o verticalmente homogéneo en cualquiera de las posibilidades extremas (López Peláez & Flor Blanco, 2008).

Las playas asociadas al Nalón como receptoras de sedimento son las que se observan en la Ilustración 7: los Quebrantos, Bayas, Salinas-El Espartal, Xagó y el conjunto Aguilerina, Carniciega, Verdicio. Esto se entiende porque, a partir del siglo XIX se llevó a cabo una gran explotación de carbón (actividad que hizo que Asturias creciera en diferentes aspectos) y, como el Río Nalón atraviesa las principales poblaciones mineras del carbón de hulla al igual que sus afluentes, contribuyen activamente a la sedimentación procedente de residuos de lavaderos. Esto es lo que da el color oscuro a las arenas de Bayas, con alta proporción de carbón. Estos sedimentos, tras muchos años de transporte se fueron depositando en las playas asociadas (Flor et al., 2009b).

A escala local, se identifican dos sectores en el frente costero con características bien distintas. Por un lado, la playa Salinas, siendo una de las playas urbanas más largas de Asturias con 1.45 km de extensión. En sus alrededores se implanta un paseo

marítimo, bares y restaurantes. Es muy visitada por el turismo, sobre todo en temporada alta.

Por otro lado, hacia el este se encuentra la playa San Juan de Nieves (conocida como El Espartal), que tiene una extensión de 1.5 km. Es una continuación de la Playa Salinas, pero en un entorno menos urbanizado, donde se conservan las dunas y con una gran importancia ecológica.

Desde un enfoque local, el sistema de playas Salinas – El Espartal se enmarca dentro de la unidad fisiográfica delimitada entre punta La Peñona (al oeste) y por Punta de La Forcada hacia el este a pesar de que el sistema de playas bajo estudio se apoya en el espigón construido para evitar el paso de arenas de la playa al canal de acceso al Puerto de Avilés, aunque su longitud no es suficiente para impedir el paso de sedimentos hacia la canal.



Ilustración 8: Zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)

En este contexto, la playa se encuentra limitada lateralmente por dos elementos: el paseo marítimo hacia el oeste (1 en la figura siguiente), y el espigón (2 en la figura siguiente).



Ilustración 9: Limitaciones hacia el este y oeste que confinan la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)



Ilustración 10: Limitaciones hacia el este y oeste que limitan la zona de estudio. Fuente: Google Street View.

En sentido norte-sur, la playa Salinas se encuentra limitada por Salinas, una parroquia del concejo de Castrillón, que ejerce una gran presión antrópica sobre la zona costera.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente la playa El Espartal aún conserva hacia el sur el cordón dunar natural, que en algunos sectores supera los 15m de altura, y sobre el cual se vienen realizando diversas tareas de protección como la instalación de pasarelas peatonales, aportes de arena, etc.

Por otro lado, el puerto de Avilés (denominado así por la ciudad que lleva su mismo nombre e implantado en la ría de Avilés), también es un factor importante del entorno en el que se encuentra la zona de estudio, dado que su canal de acceso dragado también configura una limitación hacia el este del sistema playas – dunas.

De acuerdo a información cartográfica histórica, la superficie de campo original era de 4.456.288,72 m², y actualmente se ha reducido a 490.530,46 m² de superficie no antropizada (Flores Soriano, 2015). De acuerdo a López Peláez (2008), esta reducción drástica puede explicarse a lo largo de tiempo por tres etapas: inicial con funcionamiento natural (hasta 1833), intermedia (1833-1950) y actual. La alteración más intensiva se produjo en la etapa intermedia, antropizándose 7,98 km² (56,20%), mientras que los cambios posteriores hasta la actualidad disminuyeron hasta 4,54 km² (31,97%).

Actualmente, el sistema dunar de El Espartal está constituido por tres cordones, y además de su vegetación característica y de la presencia de varias especies protegidas a nivel regional, destaca porque alberga la única representación de formaciones arbustivas dunares naturales de todo el litoral asturiano (INDUROT, 2017). Esta singularidad ha hecho que pase a formar parte en 2004 de la red europea de conservación Natura 2000 (Ilustración 11), dentro del Lugar de Interés Comunitario (LIC) Cabo Busto-Luanco y en la Zona de Especial protección para las Aves (ZEPA) del mismo nombre. Además, la playa de El Espartal fue declarada Monumento Natural de la Red Regional de Espacios Naturales Protegidos del Principado de Asturias el 21 de julio de 2006 mediante el Decreto 81/2006. Sin embargo, la delimitación del ámbito geográfico protegido establecido en el decreto de declaración del monumento natural fue modificado tras una sentencia del Tribunal Superior de Justicia del Principado de Asturias, en un recurso contencioso-administrativo interpuesto por el ayuntamiento de Castrillón contra dicho decreto. Catalogada como Playa Natural por las Directrices Subregionales de Ordenación del Territorio para la Franja Costera de Asturias. Posteriormente, en 2015 adquirió la categoría de Zona Especial de Conservación (ZEC).



Ilustración 11: Red Natura 2000 código ES1200055 Cabo Busto-Luanco. Superficie: 11.641,87 Ha. Fuente: MITECO (2025). Red Natura 2000 en España [Archivo KMZ]. Banco de Datos de la Naturaleza.



Ilustración 12: Red Natura 2000 código ES0000318 Cabo Busto-Luanco. Superficie: 10.042,57 Ha. Fuente: MITECO (2025). Red Natura 2000 en España [Archivo KMZ]. Banco de Datos de la Naturaleza.



Ilustración 13: A: Monumento Natural Isla La Deva y el Playón de Bayas. B: Monumento Natural Playa El Espartal. C: Monumento Natural Charca de Zeluán y Ensenada de Lloredo. D: Paisaje Protegido Cabo Peñas. Fuente: MITECO (2025). Red Natura 2000 en España [Archivo KMZ]. Banco de Datos de la Naturaleza.

3.2 Descripción batimetría

Para describir la configuración batimétrica a escala regional, se ha empleado la información de cartas náuticas obtenida del visualizador del Instituto Hidrográfico de la Marina, la cual se ha completado con la información procedente de GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*).

La combinación de ambas batimetrías (Ilustración 14) revela la existencia de una plataforma continental relativamente estrecha que se extiende desde la costa hasta aproximadamente los 200 metros de profundidad. A partir de ahí, se observa un talud continental pronunciado que desciende rápidamente hacia mayores profundidades.

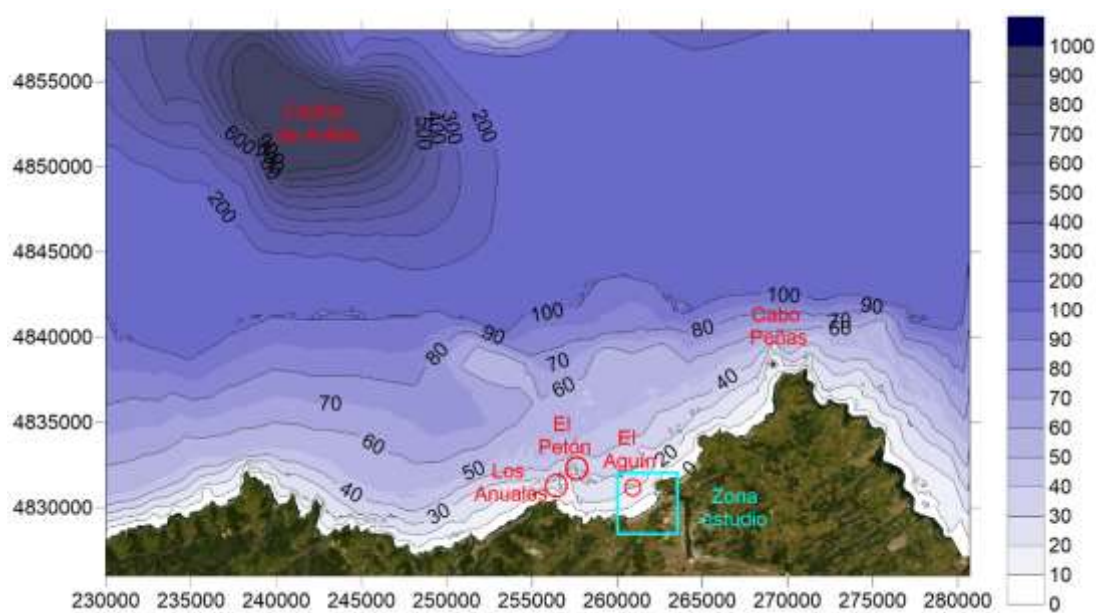
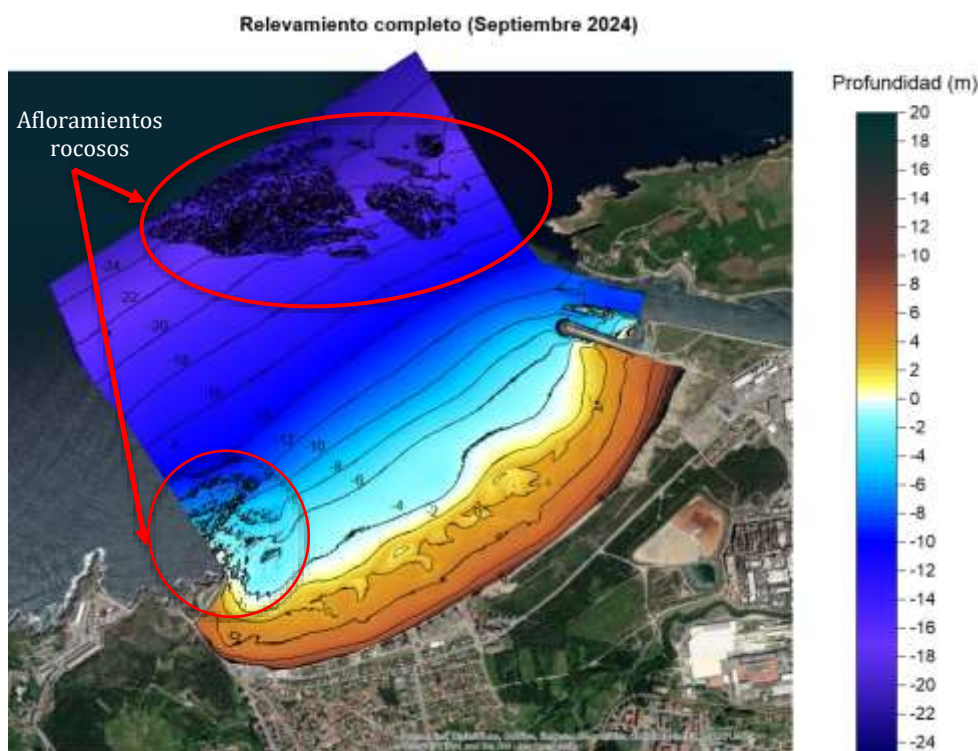


Ilustración 14: Batimetría general

Las isobatas de 10-50 metros están muy próximas a la costa, indicando un fondo marino con pendiente moderada. Entre los 50-200 metros, las isobatas se separan más, mostrando una pendiente más suave. Por otro lado, hacia el norte y noroeste, las profundidades superan los 1000 metros, con el punto más profundo alcanzando valores cercanos a los 1000-1100 metros.

Se observa, además, la presencia del cañón submarino Avilés, con profundidades superiores a los 900 m.

En cuanto a la escala local, en la imagen siguiente se observa la topobatimetría correspondiente a septiembre 2024, la última disponible aportada por la APAV. Se observa que la batimetría es recta y paralela desde aguas profundas hasta la cota -6, a partir de entonces es irregular, mostrando la presencia de barras y bancos de arena, además de afloramientos rocosos en el sector oeste y en el sector noreste.



*Ilustración 15: Topobatimetría del año 2024 (referencia: cero local) – septiembre.
Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV.*

3.3 Características granulométricas

La granulometría más reciente disponible es la realizada en mayo de 2016, por el CEDEX. En la siguiente tabla se observan los diámetros medios para los perfiles P10, P30 y P52 (ver Ilustración 16).

Cota / Perfil	P-10	P-30	P-52
6	0.28	0.28	0.30
3	0.33	0.31	0.32
Bajamar	0.32	0.34	0.30
-3	0.42	0.32	0.32
-7	0.45	0.31	0.31
-14	0.65	0.20	0.17

Tabla 1: Granulometría realizada por el CEDEX (mayo 2016). Fuente: IHCantabria (2021)

Los resultados del análisis granulométrico de las 18 muestras revelan una granulometría media de 0.34 mm considerando toda la sección transversal de la playa. Esta distribución presenta variaciones según las zonas: la franja emergida e intermareal muestra un tamaño promedio de 0.31 mm, mientras que el sector sumergido alcanza los 0.36 mm.

La distribución granulométrica se mantiene relativamente homogénea a lo largo de la costa en las zonas emergida e intermareal. No obstante, el perfil P-10, ubicado en el extremo occidental del área de estudio (sector denominado La Peñona), presenta características distintas. En este punto, el sedimento del fondo marino muestra una granulometría significativamente mayor (0.51 mm) en comparación con otros sectores analizados (0.27-0.31 mm).

Esta particularidad se explica por la naturaleza rocosa del sustrato en dicha zona, aspecto documentado en el estudio del CEDEX (2017). La morfología del fondo marino por debajo de los -3 metros de profundidad en este sector evidencia irregularidades topográficas y desniveles abruptos que permanecen estables entre diferentes campañas de medición, confirmando la presencia de afloramientos rocosos en el sustrato y explicando la mayor granulometría del sedimento en esta área específica.

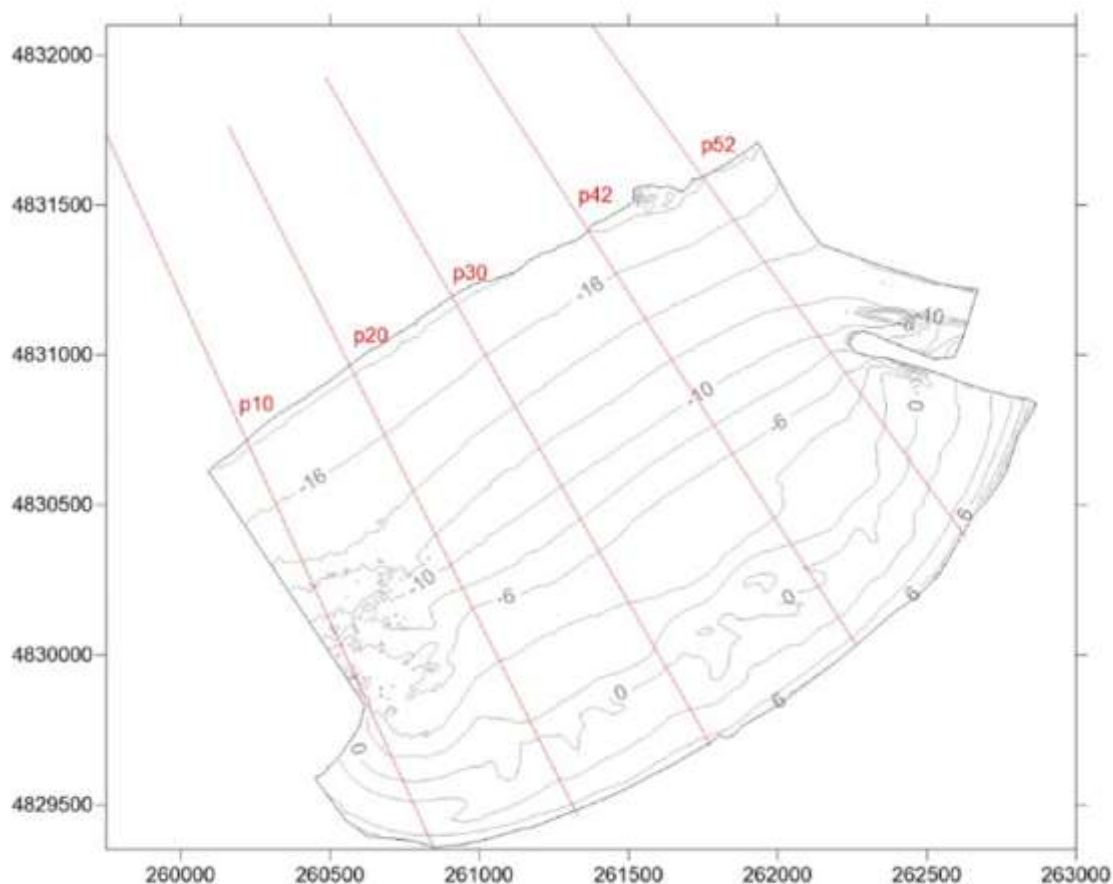


Ilustración 16: Perfiles de control empleados en el estudio del CEDEX (2017). Fuente: IHCantabria (2021)

Cabe mencionar que además se cuenta con información de diversas campañas de tomas de muestras realizadas a lo largo de distintos años:

- Campaña 1996a (IHCantabria): incluía dos campañas de campo con toma de muestras de sedimento desde el Nalón hasta la playa de Xagó en 1995 (mayo y junio). De acuerdo a este antecedente, la plataforma continental desde la desembocadura del Nalón hasta el Cabo de Peñas se encontraba cubierta con arenas finas y oscuras con restos de carbón, con un diámetro nominal entre 0.18mm y 0.22mm. Por su parte, la playa El Espartal estaba conformada por arena de tamaño medio, con un D_n entre 0.25mm y 0.45mm con alto contenido conchífero.

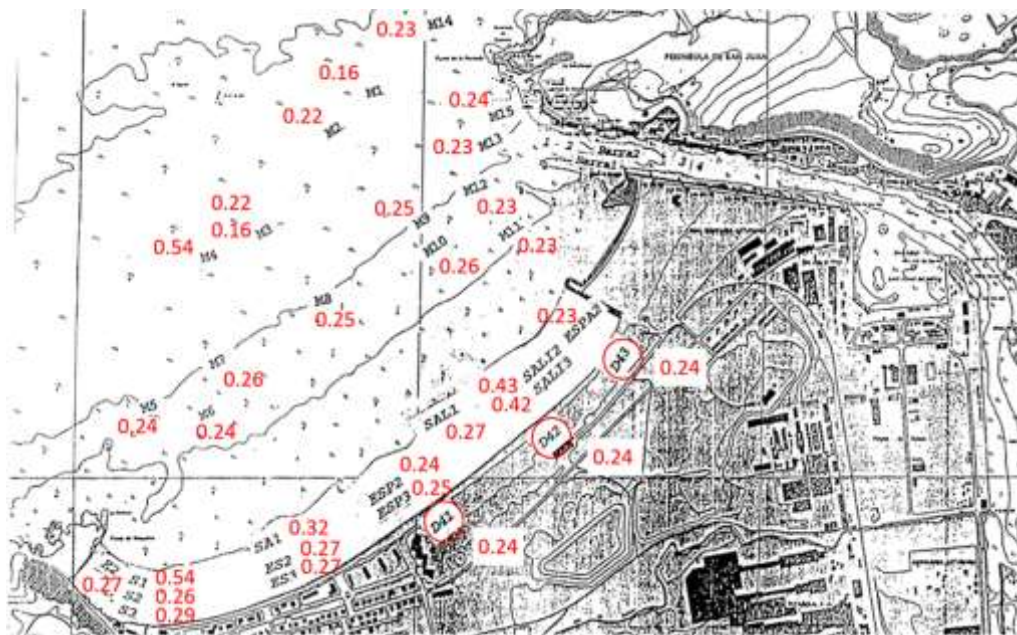


Ilustración 17:

Localización y tamaño de arena medio de las muestras tomadas en la playa Salinas-El Espartal durante la campaña de campo de 1995 (IHCantabria, 1996a). Fuente: IHCantabria (2021)

- Campaña diciembre 2001 (CEDEX): se llevó a cabo una campaña con toma de muestras en 8 perfiles a distintas cotas del perfil sumergido de la playa (-1, -3, -5, -10 y -15 m respecto al cero del Puerto)

Profundidad (m)	D50 media (mm)	D50 máxima (mm)	D50 mínima (mm)
-1	0.43	0.52	0.33
-3	0.33	0.38	0.27
-5	0.29	0.33	0.25
-10	0.32	0.35	0.28
-15	0.22	0.25	0.19

Tabla 2: Granulometría realizada por el CEDEX (diciembre 2001). Fuente: IHCantabria (2021)

- Regeneración de playa 2004/2005: se llevó a cabo una regeneración de la playa de unos 438.477,98 m³ de los 600.000 m³ previstos (CEDEX, 2010), con un tamaño medio de arena entre 0.22 y 0.43 mm (valor medio 0.29 mm).

D50 > (mm)	Nº de muestras	% sobre el total
0.43	3	4.8
0.33	18	29
0.29	30	48.4
0.32	20	32.3
0.22	43	69.4

Tabla 3: Diámetros nominales del material empleado para la regeneración de playa realizada en 2004/2005. Fuente: IHCantabria (2021)

4. REVISIÓN DE ESTUDIOS PREVIOS. HIPÓTESIS DE PARTIDA

Uno de los objetivos del presente trabajo es el análisis del modelo de funcionamiento del sistema para determinar si es un sistema cerrado o abierto. Con tal fin, se ha realizado una revisión de los estudios previos disponibles, que plantean distintas hipótesis respecto al modelo de funcionamiento del sistema.

En particular, en este estudio se ha realizado una revisión de varios informes:

- CEDEX (1994): Estudio del dique de contención de arenas en la margen izquierda de la Ría de Avilés (Asturias).
- IHCantabria (1996b): "Estudio de la canal de navegación del Puerto de Avilés y su interacción con la playa del Espartal". INFORME Nº2 "Propuesta de soluciones" (IHCantabria, 1996b).
- Artículos científicos sobre la zona de estudio como Flor-Blanco et al., (2009, 2013)
- IHCantabria (2020): "Análisis de las muestras de caracterización granulométrica y química de los sedimentos a dragar en el Puerto de Avilés".
- IHCantabria (2021) Estudio de evolución del sistema playa-dunas para dar respuesta al punto 4.4 de la DIA del proyecto de Dragado de Mantenimiento en el Puerto de Avilés.

4.1 Conclusiones obtenidas del análisis de los estudios previos

Modelo de sistema cerrado

La siguiente figura, extraída del estudio del CEDEX (1994) resume el funcionamiento del sistema, planteado bajo la hipótesis de la existencia de procesos captadores de sedimentos.



Ilustración 18: Mecanismo de transporte según el informe del CEDEX (1994).

Pueden observarse dos mecanismos, el primario, en el que se produce un transporte de sedimentos de alrededor de $80.000 \text{ m}^3/\text{año}$, producto de una corriente por gradiente de sobreelevación generada por los temporales del norte al oeste, y el secundario, en el que existe un transporte normal de $30.000 \text{ m}^3/\text{año}$ que desplaza el sedimento hacia la costa.

Modelo de sistema abierto

De acuerdo a estudios realizados por el IHCantabria (1996b), el modelo de funcionamiento del sistema playas-dunas es abierto. Bajo condiciones de temporal (del cuarto cuadrante) se generan tres bucles (ver figura siguiente).

- Un bucle exterior que ocurre a profundidades mayores a 10m, que transporta el sedimento de oeste a este.
- Un bucle de playa, que ocurre a profundidades menores a 3m, que se compone a su vez de dos bucles, uno en el sector oriental (Playa El Espartal) con sentido horario (transporte de oeste a este), y otro frente a Playa Salinas, con sentido antihorario (transporte de este a oeste).
- Un bucle interno que se forma frente al relleno que fuera dismantelado en 2002 y a la desembocadura al abrigo de Punta Forcada, y que sería responsable de la formación de la barra.

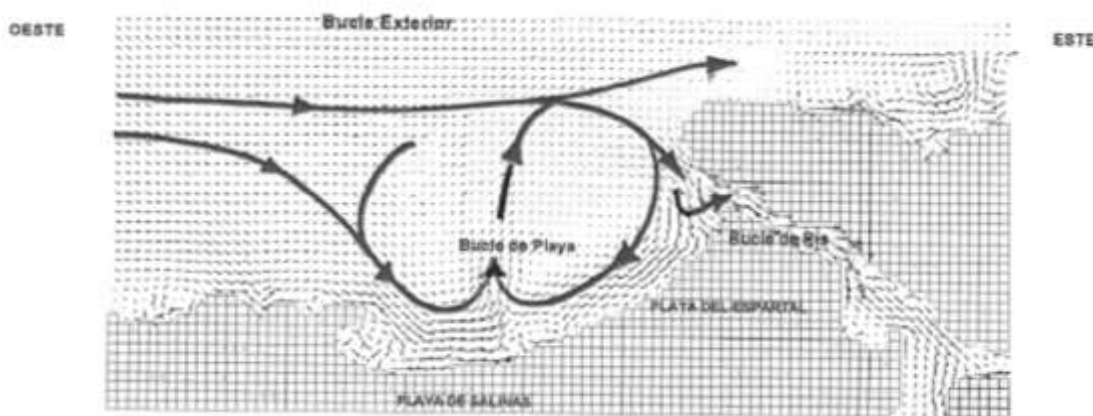


Ilustración 19: Modelo de funcionamiento propuesto por IHCantabria (1996b), bajo condiciones de temporal.

De acuerdo a este modelo de funcionamiento, la barra se forma con arenas procedentes del pie de playa, transportados por incidencia de estados de mar mayores a 2 m de altura significativa conjuntamente con la marea.

De acuerdo a Flor y Flor-Blanco (2009), el aporte de arenas desde el oeste provino de las descargas del sistema fluvial del Nalón y Narcea, junto con cambios del nivel del mar, que han posibilitado la formación de playas arenosas desde la desembocadura hacia el este, en todo el tramo comprendido entre la desembocadura del Nalón y el Cabo de Peñas. Entre los lugares destino de ese sedimento citan la playa de Salinas-El Espartal y su extenso campo dunar, así como del relleno estuario de Avilés.



Cabe mencionar que el río Nalón en 1958 aportaba un gran volumen de arena a la desembocadura, sin embargo, hoy en día esos aportes son de menor medida, dado que se han construido embalses (La Florida, La Barca, Tanes, Rioseco, Soto de Ribera) que han reducido considerablemente el volumen total de material transportado por el Río.

En el modelo de funcionamiento propuesto por estos autores, existe un transporte en sentido oeste- este, con una pérdida intensa de volumen de arena frente a playa salinas, y una ganancia relativa de volumen frente a El Espartal, que acaba dentro de la depresión profunda del canal de acceso al puerto generada por los intensos dragados. Asimismo, existe una transferencia arenosa eólica desde el frente dunar.

Aspecto	CEDEX (1994)	IHCantabria (1996b)	Flor-Blanco (2011)	IHCantabria (2020)	IHCantabria (2021)
Naturaleza del sistema	Cerrado	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
Intercambio exterior	No	Sí (Nalón + adyacentes). Llegada de arena del oeste	Sí (histórico Nalón-Narcea)	Sí (Llegada de arena del oeste)	Sí (Llegada de arena del oeste)
Mecanismo dominante	Corriente de gradiente de sobreelevación y transporte normal a la playa por oleaje. Oleaje N (normal a la playa)-O (longitudinal) + difracción Transporte longitudinal	Bucles circulatorios (3): Interno, de playa e interno. Temporal Hs>2m + marea. Circulación en bucles	Deriva litoral persistente. Acumulación histórica por aporte fluvial	Llegada de arena del oeste. Corrientes longitudinales + oleaje	Temporales del NW y WNW
Metodología validación	s/d	Carbón como trazador. Presencia en la ensenada de Avilés de sedimentos biogénicos y de SiO ₂ de las adyacencias del Nalón	Análisis geológico evolutivo	Análisis granulométrico- químico	Modelado numérico de patrones de corrientes y oleaje
Origen de arena que llega a la barra del canal	De la playa	De la playa	De la playa	De la playa	De la playa

Tabla 4: Comparación de modelos de funcionamiento



Ilustración 20: Modelos de funcionamiento de distintos autores. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

Como se observa, tanto Flor-Blanco (2011) como los estudios realizados por IHCantabria (1996) apoyan la teoría de un modelo abierto, existiendo un consenso respecto a que el origen de los sedimentos es el aporte de la descarga del Río Nalón, proveniente del oeste.

Para que el sistema se considere abierto tiene que estar claro también el mecanismo por el cual el sistema pierde sedimentos. Este mecanismo se explica muy detalladamente en el modelo de funcionamiento más actual, que es el propuesto por el IHCantabria (2021), explicando que los temporales y oleajes de diferentes direcciones generan patrones distintos de corrientes y transporte de sedimento. Cuando se producen temporales del noreste (NE) y nor-noreste (NNE), las corrientes predominantes se mueven de este a oeste, arrastrando arena hacia La Peñona. Sin embargo, la respuesta del sedimento no es la misma: con temporales del NE la arena tiende a perderse en zonas profundas, mientras que con temporales del NNE el material continúa desplazándose hacia el oeste sin llegar a perderse.

Los oleajes del norte (N) originan una corriente que también se dirige hacia el oeste, pero que se bifurca en dos ramas. Una de ellas transporta arena hacia zonas profundas en el centro de la ensenada, mientras que la otra se mantiene más próxima a la costa en el sector central. En esta última, la intensidad disminuye y se genera una corriente de retorno que deposita sedimento en las primeras cotas del perfil sumergido.

Con oleajes del nor-noroeste (NNW) la dinámica es similar, pero las intensidades de las corrientes favorecen la acumulación de arena. Así, se observa sedimentación en el sector occidental protegido por La Peñona, en la zona central de la playa y, además, una corriente de retorno que transporta material hasta unos 6 metros de profundidad.

En el caso de los oleajes del noroeste (NW) (Ilustración 21) y oeste-noroeste (WNW) (Ilustración 22) se forman dos circuitos de circulación conectados. El circuito exterior, que actúa por debajo de los 8 metros de profundidad, se comporta de forma distinta según el tipo de oleaje. Con oleajes del WNW es prácticamente una única corriente que entra desde el oeste de la ensenada y se dirige al este, perdiendo su capacidad de transporte en la canal de navegación y alimentando al circuito más próximo a la costa en los dos extremos y en el centro de la playa. Con temporales del NW esta corriente se desvía hacia aguas más profundas en el centro de la ensenada, y desde allí se origina otra que se dirige al morro del espigón. Esta corriente se bifurca: una rama deposita arena en la canal de navegación, y la otra alimenta al circuito más próximo a la costa.

El circuito más cercano a la costa, por encima de los 6 metros de profundidad, genera corrientes longitudinales desde La Peñona hacia el sector oriental, donde confluyen con la corriente de este a oeste que se forma en el bucle del circuito exterior y avanza pegada al espigón.

De todos los patrones analizados, el único sistema de corrientes que realmente transporta arena hacia la canal de navegación es el asociado a temporales del NW y WNW. En estos casos, la arena procede mayoritariamente del oeste de la zona exterior del sistema, es decir, de profundidades superiores a 8 metros de la ensenada. Solo durante temporales del NW y WNW coincidiendo con pleamar podría considerarse que parte del sedimento proviene del entorno inmediato de la

línea de playa. En estas circunstancias se genera una corriente de oeste a este en el sector oriental de la playa, que rebasa el espigón y pierde su capacidad de transporte dentro de la canal.

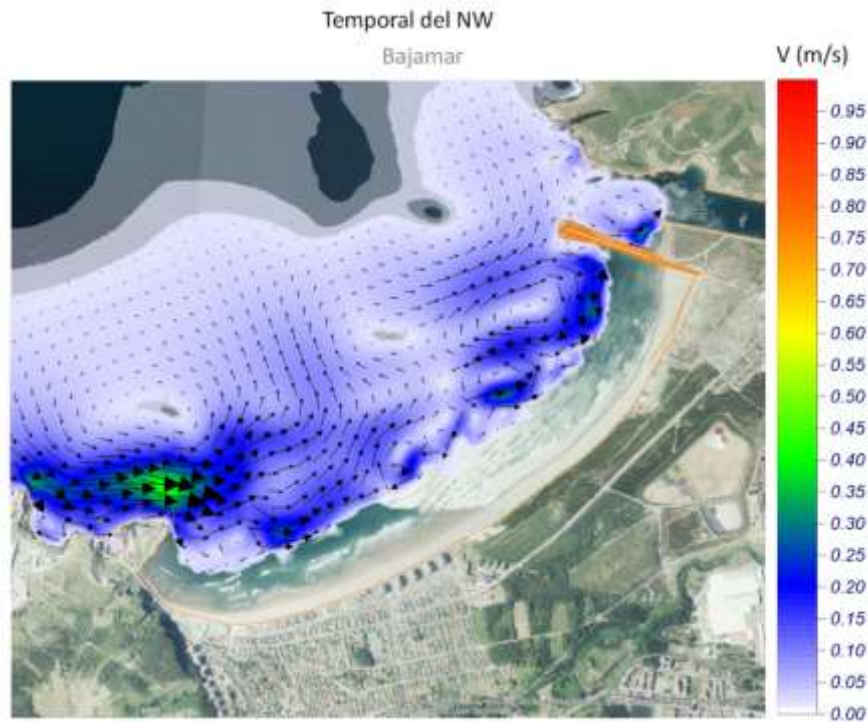


Ilustración 21: Patrones de corriente – temporal del NW (bajamar). Fuente: IHCantabria (2021)

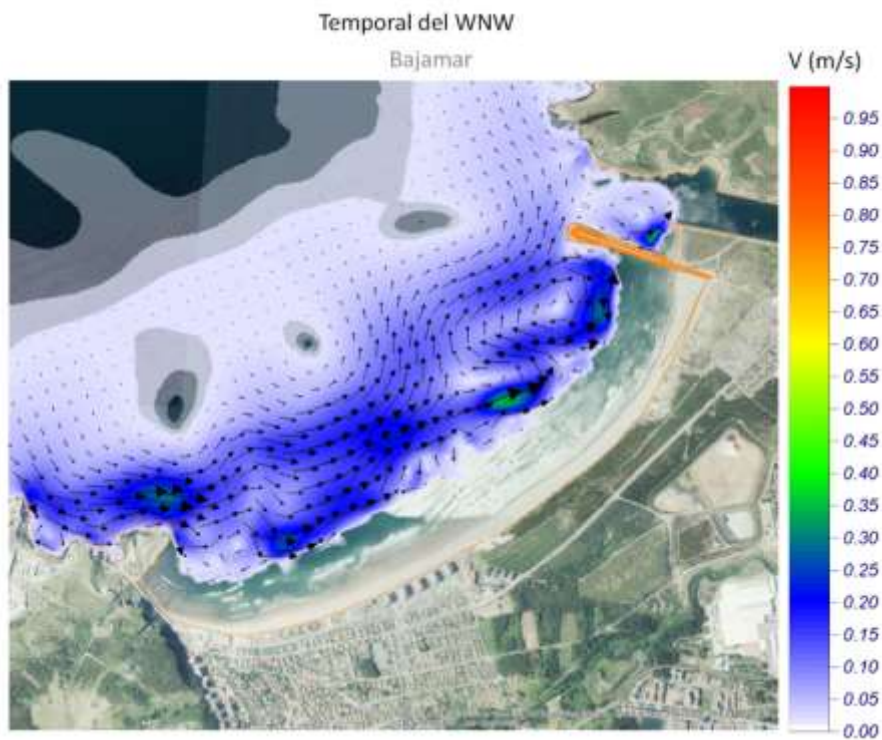


Ilustración 22: Patrones de corriente – temporal del WNW (bajamar). Fuente: IHCantabria (2021)

Influencia de los dragados en la pérdida de arena del sistema

En IHCantabria (2021) se recopila información sobre los volúmenes de dragado históricos realizados en la Ría de Avilés. La figura a continuación resume los volúmenes extraídos desde 1957 (línea azul) para mantener el canal de entrada, tomando datos de distintas fuentes: IHCantabria (1996a), la Autoridad Portuaria de Avilés (APAv), CEDEX y Flor-Blanco et al. (2013). Sólo se incluyen los dragados en la barra y el canal, ya que son los que más influyen en la playa, y se excluyen aquellos que contenían roca cuando se disponía de esa información. A esta información antecedente, se han agregado los volúmenes correspondientes a los últimos dragados de 2021 y de 2024.

Asimismo, dado que una de las hipótesis sobre los modelos de funcionamiento es que la arena proviene del oeste debido de las descargas del Nalón, resultó de interés sumar al gráfico los volúmenes de dragados realizados en San Esteban de Pravia (línea roja), para los años sobre los que se tiene información.



Ilustración 23: Análisis histórico de dragados en Avilés y San Esteban de Pravia. Fuente: Elaboración propia en base a datos de IHCantabria (2021) y agregado de volúmenes de dragados recientes.

En el gráfico anterior se observa la diferencia de magnitudes entre el dragado de ambos sectores. El pico de volumen dragado en San Esteban de Pravia ocurrió durante los años 1957-1958, por un valor de $1.463.700 \text{ m}^3$, mientras que el de Avilés, ocurrido en 1994 alcanza los 438.413 m^3 . Se observa también que la década del 50 fue la de mayor intensidad de dragados en Pravia, disminuyendo progresivamente a partir de la década del 70. Por su parte, Avilés mantiene los volúmenes de dragado dentro de un rango uniforme de hasta 200.000 m^3 , exceptuando el pico mencionado anteriormente. Puntualmente, para el período mencionado por la DIA, los dos dragados ejecutados fueron de 33.000 m^3 y 94.904 m^3 para los años 2024 y 2021 respectivamente.

Por otro lado, en la imagen a continuación se observan los puntos de descarga. En Pravia, antiguamente se descargaba el sedimento en una zona ubicada a 2 millas al noreste de la desembocadura (el punto ha sido ubicado tentativamente en la Ilustración 24), y actualmente las descargas se realizan en un punto ubicado en coordenadas $43.6^\circ\text{N } 6.062^\circ\text{W}$, situado a más de 30m de profundidad. En cuanto a los dragados en Avilés, el punto de descarga se ubica frente a playa Xagó, a una profundidad mayor a los 30m.



Ilustración 24: Ubicación de los puntos de descarga de dragados en Avilés y San Esteban de Pravia

La caracterización histórica de las actividades de dragado en ambas localizaciones constituye un elemento importante para identificar alteraciones en la dinámica morfológica del sistema playa-dunas de Avilés y establecer su correlación con estas intervenciones, permitiendo así evaluar los potenciales impactos asociados a las obras de profundización.

5. ESTUDIO DE DINÁMICA MARINA Y LITORAL

5.1 Clima marítimo

5.1.1 Clima marítimo en aguas abiertas

Oleaje

Los datos para el análisis climático de la zona de estudio provienen de la base de datos meteoceánicas GOW (*Global Ocean Waves*) desarrollada por IHCantabria (Pérez Menendez & Losada, 2017), que permite disponer de series históricas del oleaje desde 1979 hasta la actualidad. Su objetivo principal es proporcionar datos continuos y homogéneos de las condiciones del mar para estudios climáticos y aplicaciones de ingeniería marina.

Esta base de datos global se ha generado con el modelo numérico WAVEWATCH III (WW3, Tolman, 2014), que es un modelo de oleaje de tercera generación desarrollado por la NOAA-NCEP. En general el modelo se puede aplicar a grandes escalas espaciales y fuera de la zona de rompientes. Incluye parametrizaciones de procesos físicos de generación y disipación del oleaje debido a las acciones del viento, interacciones no lineales, disipación ('whitecapping') y fricción con el fondo. Este modelo utiliza como entrada los datos meteorológicos del reanálisis ERA5, que proporciona información horaria de vientos y cobertura de hielo con alta resolución espacial para todo el planeta. ERA5 es considerado uno de los productos meteorológicos más precisos disponibles, ya que combina observaciones de múltiples fuentes con modelos numéricos avanzados.

Para realizar las simulaciones, el modelo requiere información detallada del fondo marino y la geografía costera. Esta información proviene de bases de datos globales como GEBCO para la batimetría y GSHHS (Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline dataset) para las líneas de costa, ambas con alta resolución. El dominio de cálculo se estructura mediante una malla que cubre todo el globo con resolución de 25 kilómetros en zonas costeras y 50 kilómetros en océano abierto.

Como resultado, GOW proporciona series temporales horarias de las principales características del oleaje para cualquier punto del océano mundial. Estas incluyen la altura de las olas, sus períodos característicos, las direcciones de propagación y la dispersión direccional. Los datos distinguen entre el oleaje generado localmente por vientos cercanos y el oleaje de fondo que proviene de tormentas distantes.

Para caracterizar el oleaje se ha seleccionado el punto de la base de datos GOW de coordenadas 43°37'30.00"N y 6° 0'0.00"O, próximo al área de estudio situado en profundidades indefinidas, que ha permitido disponer de una serie horaria en el período enero 1979-marzo 2025. Esta serie ha sido calibrada y aportada por IHCantabria para la realización del presente trabajo.

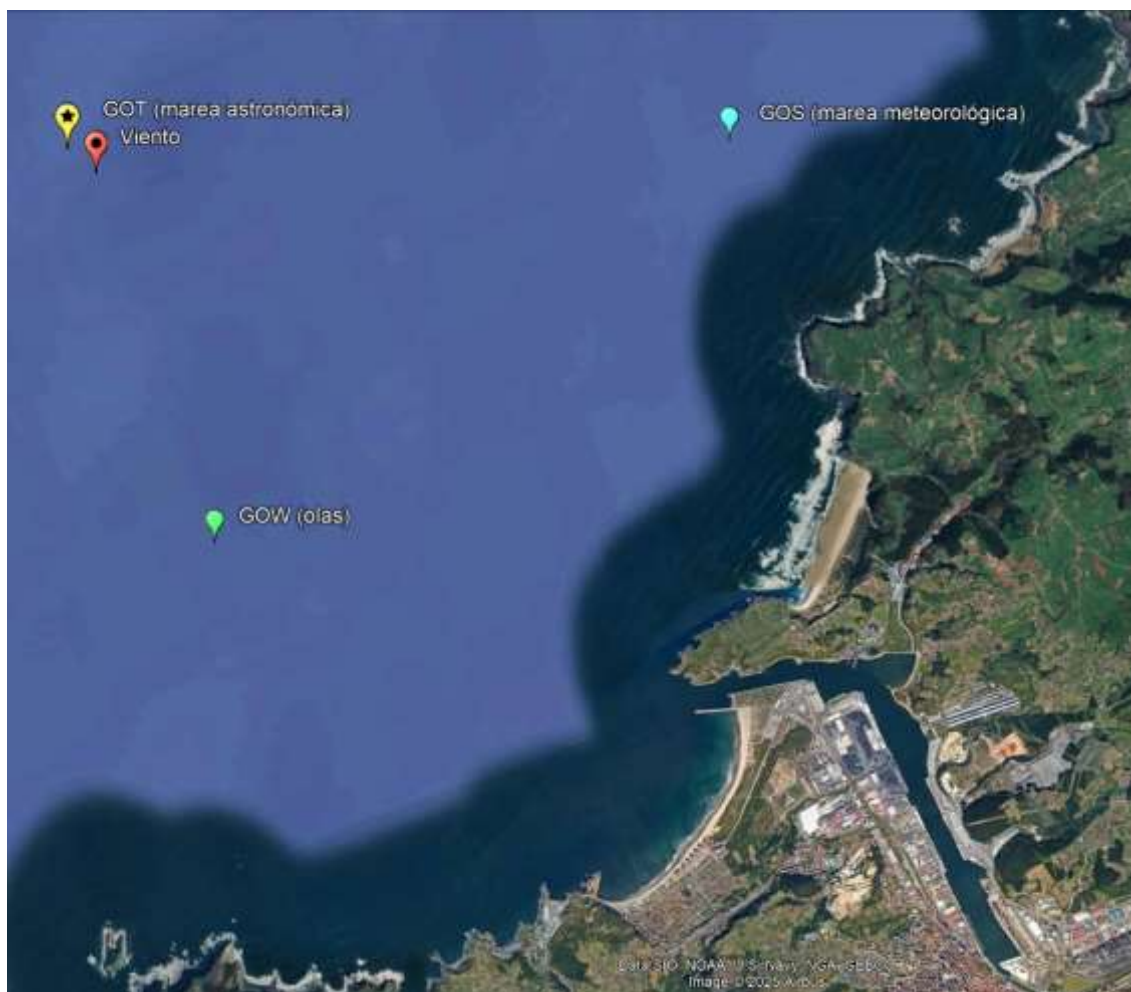


Ilustración 25: Ubicación de los puntos de obtención de datos climáticos

Clima medio

Análisis anual

En la siguiente figura se muestra en primer lugar, la serie de altura de ola significativa, de la cual se desprende que ocurren a lo largo de toda la serie, varios picos de H_s entre los 6 m y 7m.

La rosa de oleaje de altura de ola significativa indica que el oleaje proviene predominantemente de la dirección NW y NNW, mientras que la rosa de período pico indica que los períodos más largos se concentran en las direcciones de mayor fetch (NW y NNW).

En la citada imagen también se observa el régimen medio de altura de ola significativa ajustado a una función GEV, y la tabla de probabilidad de ocurrencia de las direcciones de procedencia del oleaje que llega a la zona de estudio, así como los estadísticos más representativos de cada dirección. Tal y como se aprecia en la rosa de oleaje y tabla de distribución de oleajes de la figura, los oleajes reinantes en aguas abiertas provienen del NW (53.15%), NNW (27.86%) y N (8.87) y los más energéticos que pueden llegar a la zona de estudio proceden del NNW y NW.

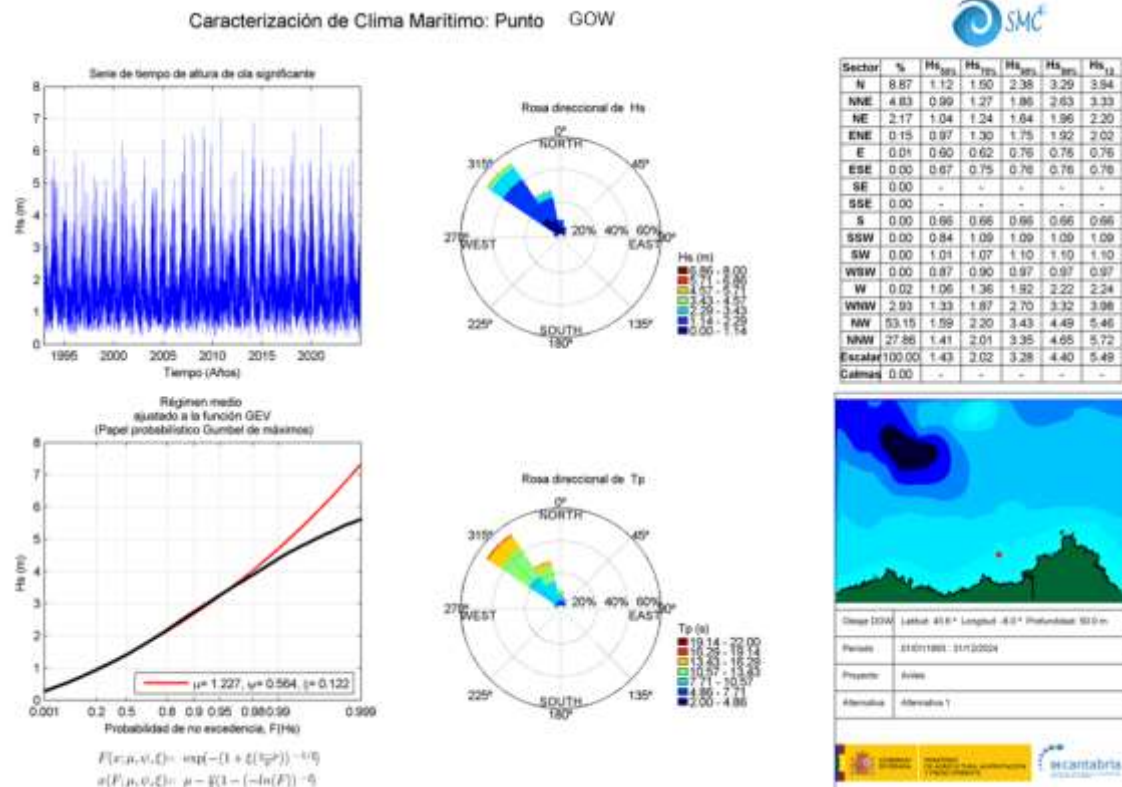


Ilustración 26: Régimen medio off-shore en el punto GOW. Fuente: Elaboración propia.

Las imágenes a continuación corresponden a la curva de distribución acumulada e histograma de Hs. Se desprende de ellas que el 50% del tiempo los valores de Hs son iguales o menores a 1.43 m, mientras que sólo el 5% de los eventos superan un valor de 3.28m. La pendiente de la curva acumulada entre 0.5m y 2.5m indica una concentración de datos en este rango.

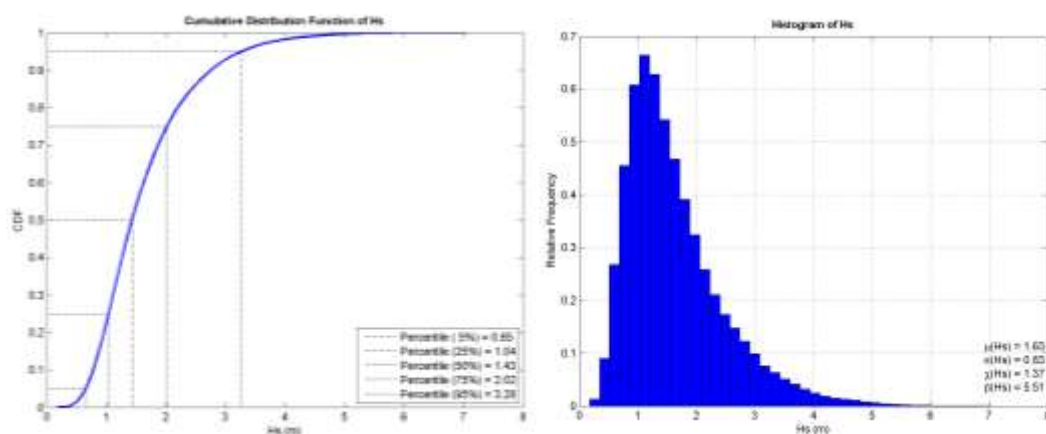


Ilustración 27: Regimen medio off-shore en el punto GOW. Función de distribución acumulada CDF (izquierda) e histograma (derecha). Fuente: Elaboración propia.

Análisis mensual / estacional

El análisis estacional del oleaje en la zona de estudio revela un patrón climático claramente bimodal característico del mar Cantábrico, con diferencias muy marcadas entre la estación invernal y estival.

Durante los meses de invierno (octubre a marzo), el régimen de oleaje se caracteriza por una notable intensidad y variabilidad. Las alturas significantes presentan medianas que oscilan entre 1.5 y 2.0 metros, con una dispersión considerable que refleja la alternancia entre períodos de calma y episodios tormentosos intensos. Los eventos extremos son frecuentes durante esta época, registrándose valores de más de 7m asociados a temporales atlánticos, siendo especialmente destacables los meses de enero, febrero y marzo. Los períodos pico alcanzan valores de hasta 20 segundos, indicativo de la llegada de swell de largo recorrido generado por borrascas en el Atlántico Norte.

En contraposición, el período estival (mayo a septiembre) muestra un comportamiento radicalmente diferente, con alturas significativas que raramente superan los 3-4 metros y medianas que se sitúan entre 0.8 y 1.2 metros. La variabilidad durante estos meses es considerablemente menor, reflejándose en distribuciones más compactas con escasos eventos extremos. Los períodos pico se mantienen generalmente en el rango de 5-10 segundos.

Los meses de transición (abril y octubre) presentan características intermedias, actuando como períodos de cambio gradual entre ambos regímenes.

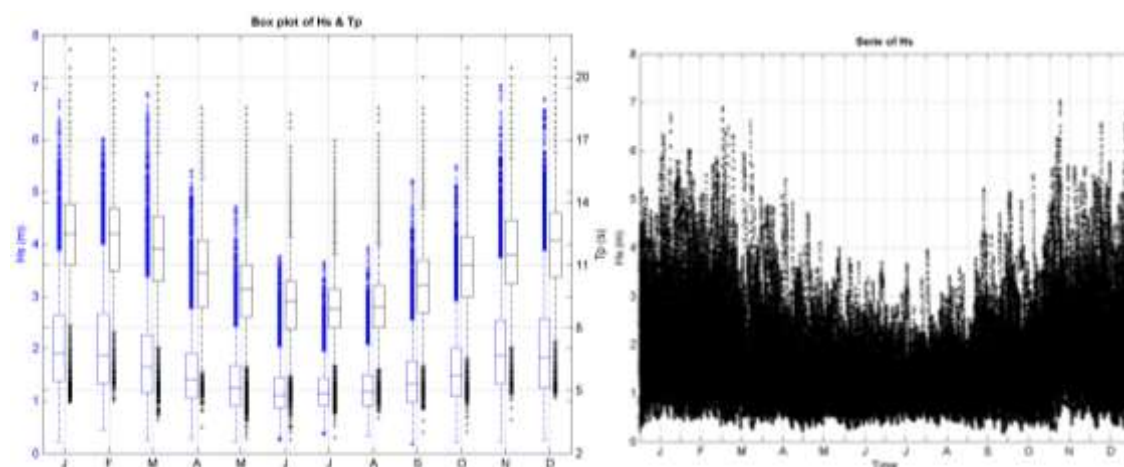
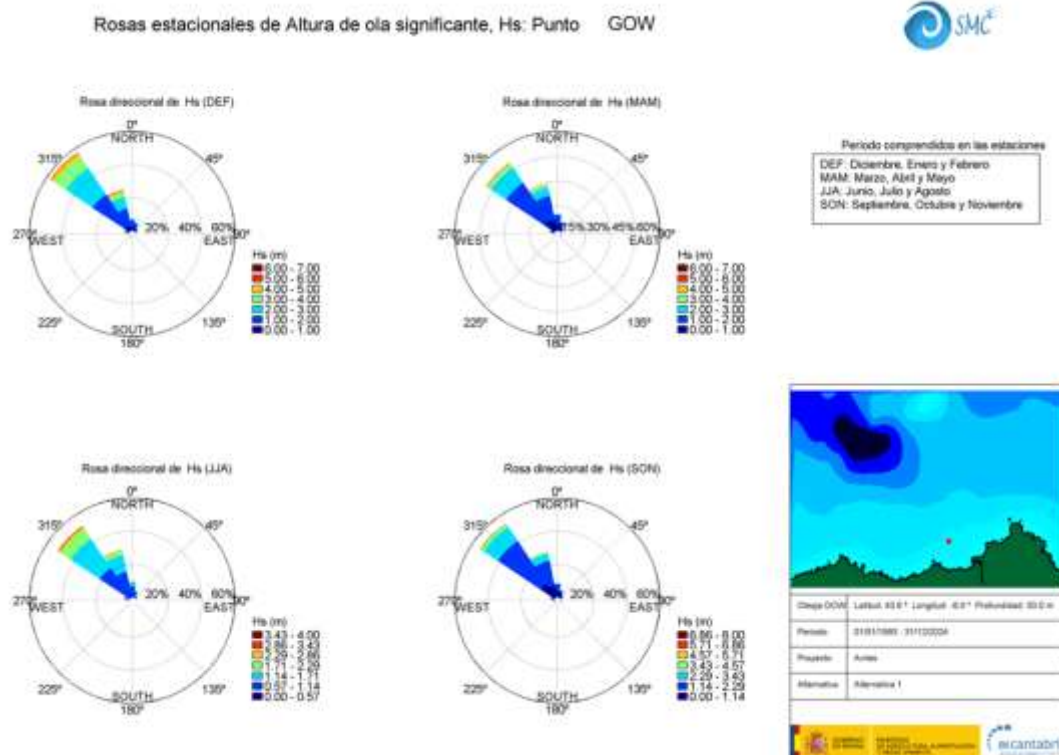


Ilustración 28: Análisis mensual / estacional del oleaje off-shore

Asimismo, en la imagen a continuación se observan las rosas de oleaje por estación, destacando que la dirección predominante del oleaje (NW) se mantiene constante a lo largo del año.



Clima extremo

La Hs máxima corresponde a un temporal ocurrido el 9/11/2010, con un valor de 7.029 m, período pico de 16.9 segundos y dirección 325°. La tabla a continuación ordena de mayor a menor las mayores alturas de ola registradas cada año. Destacan en ella los dos temporales ocurridos en 2010 y 2014, mientras que en los últimos diez años no se registraron temporales tan severos como los mencionados anteriormente.

Año	Hs max (m)	Fecha	Tp (s)	Año	Hs max (m)	Fecha	Tp (s)
2010	7.029	9-nov-10	16.9	2015	5.705	24-feb-15	16.7
2014	6.896	3-mar-14	17.9	2019	5.696	15-nov-19	13.5
2020	6.789	28-Dec-2020	16.1	2021	5.658	27-nov-21	12.8
2009	6.752	24-Jan-2009	14.7	2017	5.63	27-Dec-2017	13.5
2018	6.614	24-mar-18	14.7	2023	5.526	16-Jan-2023	14.5
2007	6.563	09-Dec-2007	17.5	2016	5.49	8-feb-16	18.2
2005	6.338	18-Jan-2005	16.1	2012	5.405	18-Apr-2012	15.9
2008	6.324	10-mar-08	16.7	2006	5.336	08-Dec-2006	15.9
2000	6.27	6-nov-00	14.9	1998	5.227	02-Jan-1998	15.6
2013	6.021	6-feb-13	15.9	2011	5.197	16-Dec-2011	13.9
1996	6.003	7-feb-96	13.9	2022	5.197	21-nov-22	12.2
1993	5.86	27-feb-93	11.9	2004	5.143	26-Dec-2004	14.1
2001	5.79	27-feb-01	13.5	1994	5.036	01-Apr-1994	16.1
2003	5.77	30-Jan-2003	11.6	1995	5.013	8-mar-95	14.3
1999	5.763	27-Dec-1999	14.7	2002	4.797	02-Dec-2002	14.9
2024	5.734	26-feb-24	13	1997	4.74	15-feb-97	13.5

Tabla 5: Mayores Hs registradas en cada año de la serie temporal de oleaje.

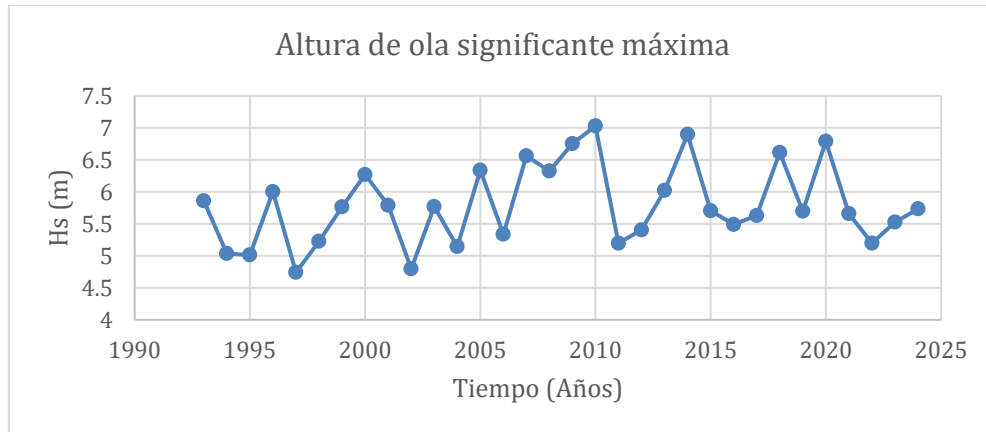


Ilustración 30: Mayores hs registradas en cada año de la serie temporal de oleaje.

La imagen a continuación corresponde al ajuste de la distribución GEV (Generalized Extreme Value) para el análisis de valores extremos. Dicha función se expresa como:

$$F(x; \mu, \psi, \xi) = \exp \left(- \left(1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\psi} \right) \right)^{-1/\xi} \right)$$

Donde:

μ : es el parámetro de localización

ψ : es el parámetro de escala

ξ : es el parámetro de forma

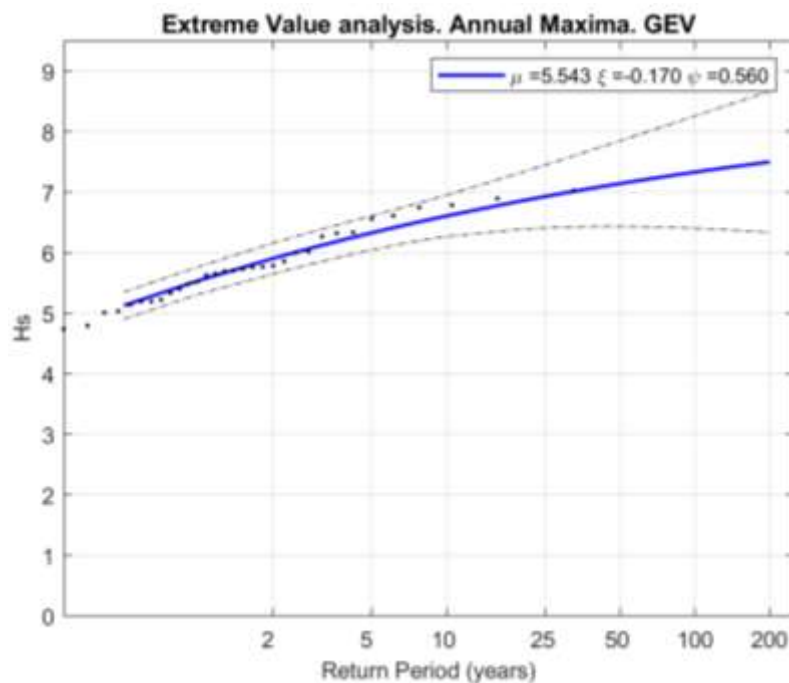


Ilustración 31: Análisis de extremos oleaje off-shore (ver ubicación del punto en la Ilustración 25). Ajuste de distribución GEV

La tabla a continuación indica los valores de Hs obtenidos, para cada período de retorno.

Período de retorno (años)	Hs GEV (m)
2	5.742
3	6.0116
5	6.2844
10	6.5902
15	6.7462
20	6.849
25	6.9247
30	6.9841
40	7.0738
50	7.1402
68	7.2274
100	7.3301
200	7.4982
250	7.5482
300	7.5876
400	7.6473
475	7.6816
500	7.6916

Tabla 6: Análisis de extremos – oleaje off-shore.

Niveles

La información necesaria para la obtención del régimen del nivel de marea se ha obtenido de la combinación de la serie de marea meteorológica con la serie de marea astronómica, en los puntos observados en la Ilustración 25.

Respecto a la marea meteorológica se ha empleado un punto de la base de datos GOS (*Global Ocean Surges*) generada por IHCantabria. Los datos que allí se observan se desprenden de un modelo oceánico forzado con vientos de superficie provenientes del ERA5 es un conjunto de datos de reanálisis climático desarrollado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF) como parte del programa Copernicus Climate Change Service (C3S). La ubicación del punto es 43°38'39.84"N y 5°54'52.56"O. Los datos corresponden al período 1993-2024, con datos cada una hora.

En cuanto a la marea astronómica, los datos corresponden al período entre 1993-2024, con datos cada una hora. La ubicación del punto es 43°40'0.12"N y 6° 0'0.00"O.

Las imágenes a continuación contienen los resultados obtenidos, con referencia en el nivel medio del mar local (2.49 m). Puede observarse que el nivel total (Ilustración 32) combina ambas componentes (astronómica y meteorológica), y mantiene el carácter bimodal de la marea astronómica, con una amplitud de casi 5m. Por otro lado, la marea meteorológica (Ilustración 33) se presenta en rangos de amplitud de

entre -0.4 m los más comunes, y aproximadamente 0.8 m los más extremos, no siendo un factor preponderante frente a la marea astronómica. Esta última (Ilustración 34) presenta una marcada distribución bimodal con picos simétricos alrededor de -1 y +1 metro, característica de las mareas semidiurnas. El rango amplio (5 m) indica un régimen macromareal.

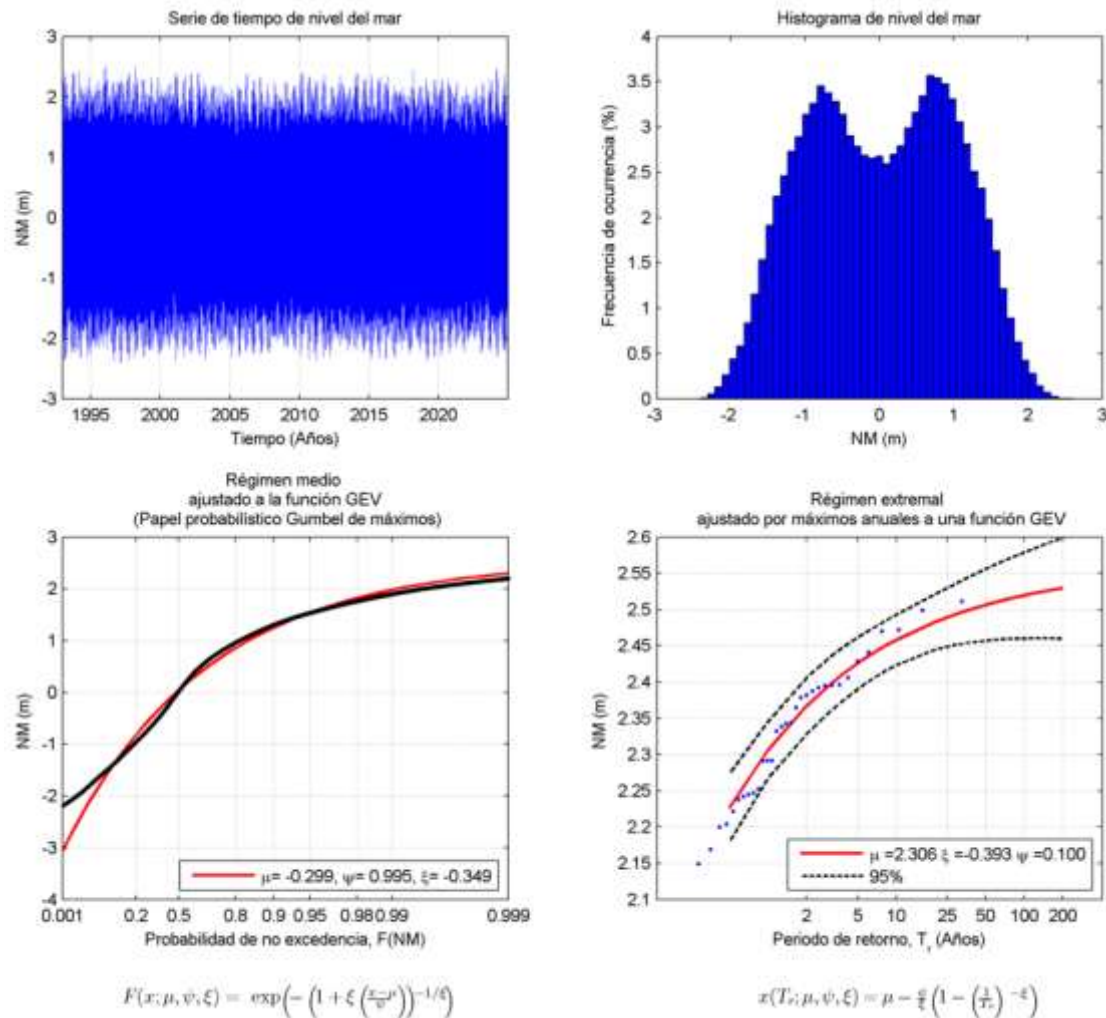


Ilustración 32: Análisis del nivel del mar total

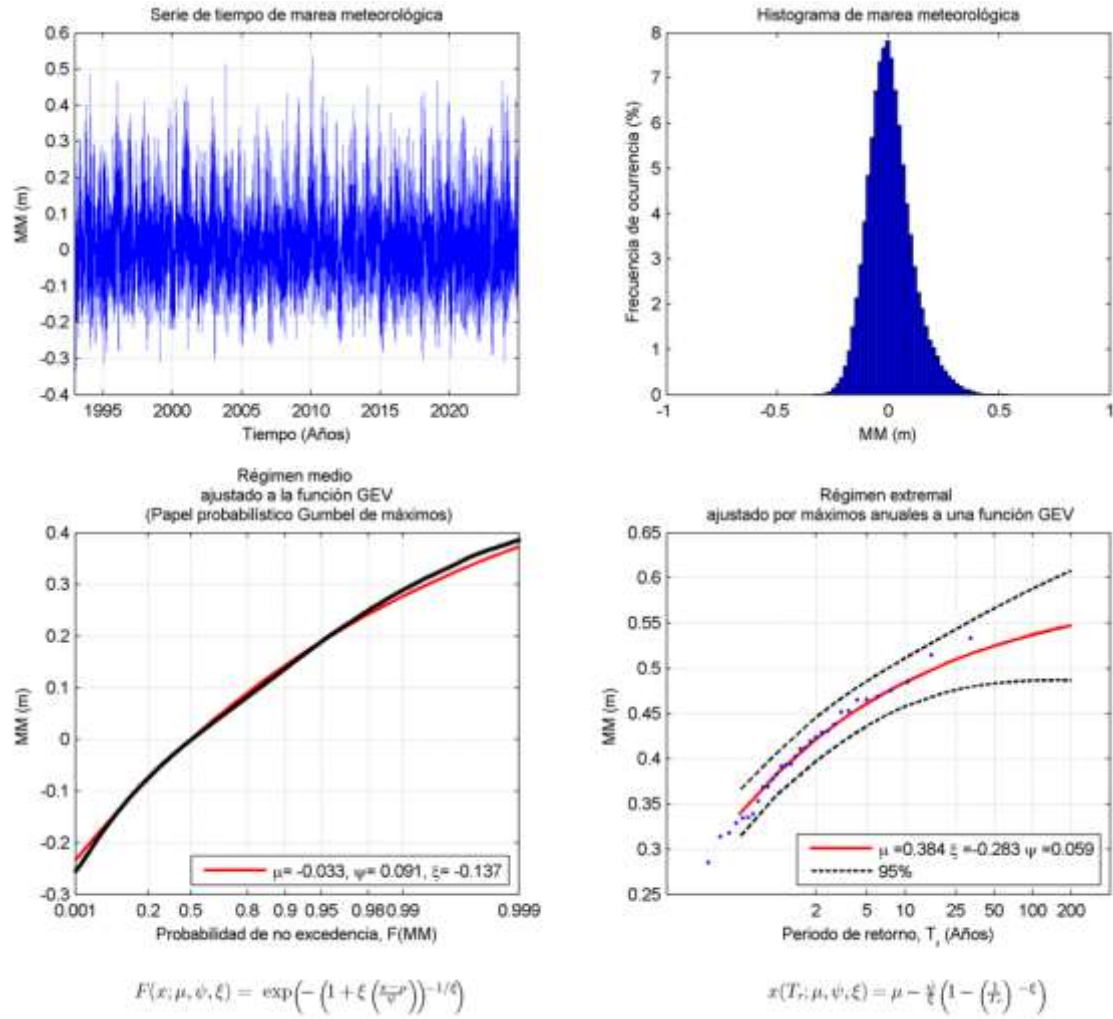


Ilustración 33: Análisis de la marea meteorológica

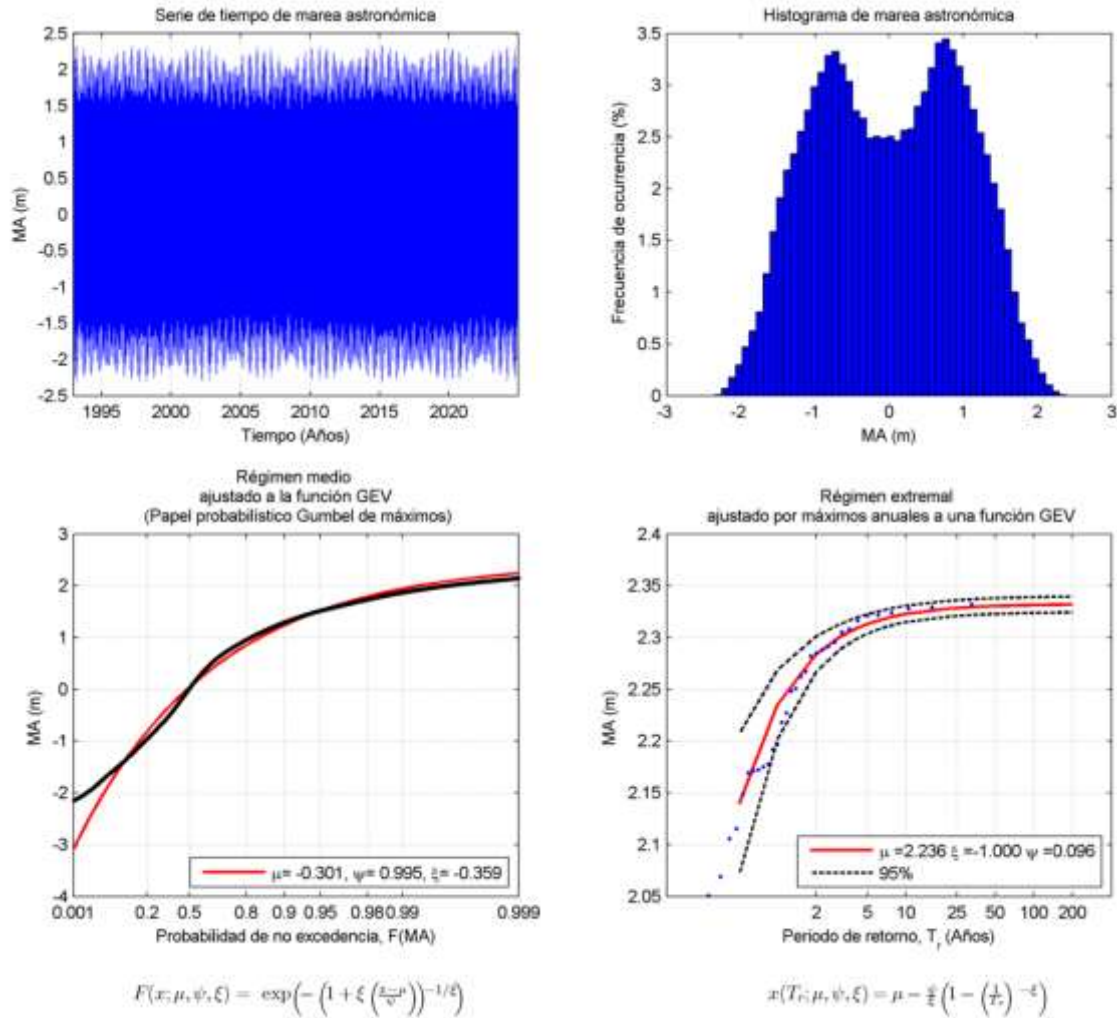


Ilustración 34: Análisis de la marea astronómica

Viento

Análisis anual

Para analizar el viento se cuenta con una serie histórica proveniente de un modelo global con forzamiento derivado del modelo CFS (Climate Forecast System), modelo global desarrollado por el NCEP/NOAA. La serie histórica abarca el periodo 1985-2022. La ubicación del punto es 43°39'48.24"N y 5°59'51.00"O (ver Ilustración 25). La imagen a continuación representa la rosa de direcciones de viento, destacando la preponderancia de vientos del este y oeste.

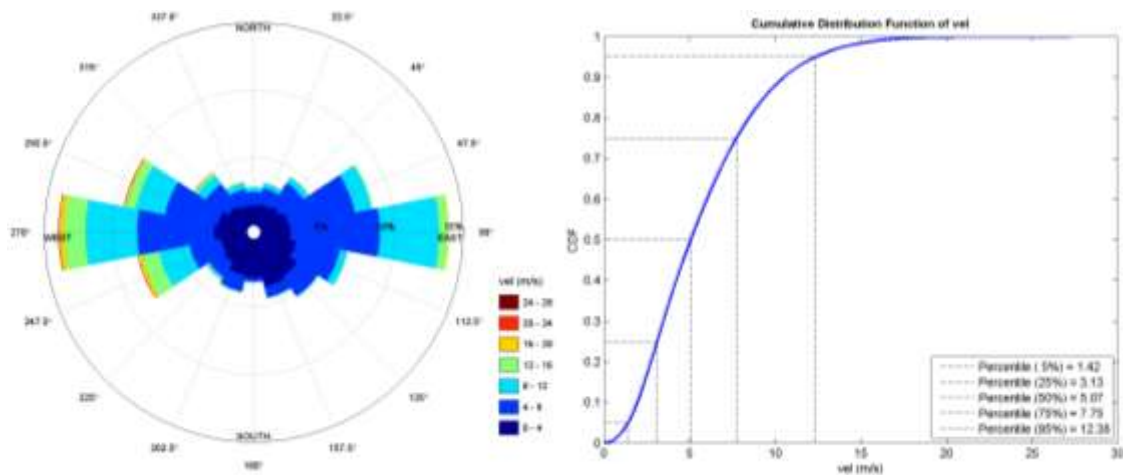


Ilustración 35: Rosa de vientos (izquierda) y curva de distribución acumulada (derecha)

Los sectores norte y sur registran frecuencias considerablemente menores. Respecto a la intensidad por dirección, los vientos provenientes del oeste incluyen los eventos más intensos que alcanzan velocidades de 20 a 28 m/s, representados en la rosa de vientos con colores rojos y naranjas. Los vientos del este, por su parte, se caracterizan por velocidades predominantemente moderadas a altas, en el rango de 8 a 20 m/s, con una menor presencia de velocidades extremas.

La distribución acumulativa de velocidades presenta una mediana de 5.07 m/s que indica que la mitad de las observaciones registran velocidades por debajo de este valor. El análisis de percentiles revela una variabilidad moderada en los datos, con un rango intercuartílico que se extiende desde 3.13 m/s en el percentil 25 hasta 7.75 m/s en el percentil 75. El percentil 95, que alcanza los 12.38 m/s, demuestra que solo el 5% de las observaciones superan esta velocidad, confirmando que los eventos de viento fuerte son relativamente poco frecuentes en la zona de estudio. Esta tendencia se verifica en el scatter de velocidad y dirección que se incluye en la siguiente imagen.

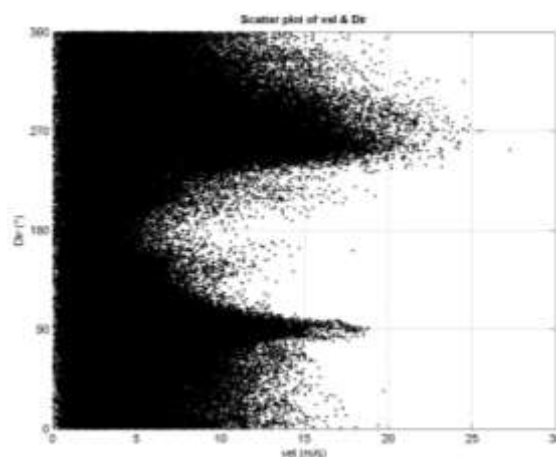


Ilustración 36: Scatter velocidad – dirección del viento.

Análisis mensual / estacional

El análisis estacional (ver Ilustración 37) revela que las mayores intensidades ocurren en época invernal, alcanzando intensidades de 25 m/s, mientras que en verano pueden alcanzar entre 15 m/s y 20 m/s.

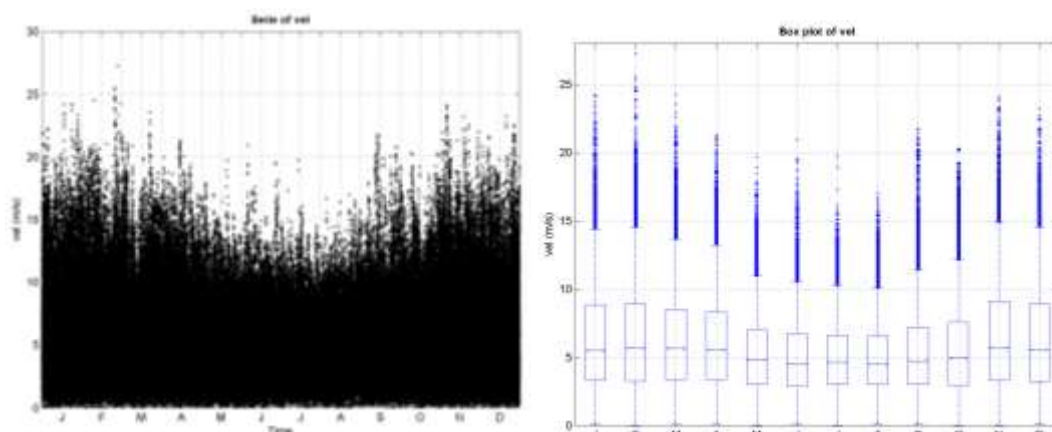


Ilustración 37: Análisis mensual de intensidades de viento

El diagrama de cajas confirma la variabilidad estacional en la velocidad del viento, con diferencias notables entre los meses de invierno y verano. Los meses de enero a marzo muestran las medianas más altas, con valores que oscilan entre 5.5 y 6.0 m/s. A partir de abril se observa una transición hacia velocidades menores, con abril presentando una mediana ligeramente inferior, pero manteniendo aún características similares al período invernal. Los meses de mayo, junio, julio y agosto configuran el período de menor actividad, con medianas que descienden por debajo de los 5.0 m/s.

La dispersión de los datos, representada por la altura de las cajas, muestra comportamientos diferenciados según la estación. Los meses invernales presentan una dispersión moderada. En contraste, los meses de verano muestran cajas ligeramente más compactas, sugiriendo una menor variabilidad en las velocidades, pero también un régimen más estable, aunque de menor intensidad.

La presencia de valores atípicos es especialmente notable en los meses invernales y de transición, donde se registran velocidades que alcanzan y superan los 25 m/s. Enero, febrero y marzo muestran la mayor cantidad de valores extremos, con algunos eventos que superan los 26 m/s, indicando la ocurrencia de episodios de viento muy fuerte durante estos meses.

5.1.2 Clima marítimo en la zona de estudio

En el presente apartado se resumen los resultados obtenidos en el análisis del clima marítimo de la zona de estudio en la situación actual, entendiendo como tal, la correspondiente a la configuración batimétrica de la playa de septiembre de 2024, dado que es la más reciente de las disponibles para la realización de este estudio.

Para caracterizar las condiciones de oleaje en la zona costera, se ha aplicado una metodología de downscaling híbrido que combina la selección estadística de casos representativos con la propagación numérica desde condiciones de aguas profundas hasta la costa.

Para la selección de casos representativos se ha empleado la técnica de clasificación MaxDiss (Maximum Dissimilarity), que permite seleccionar un conjunto reducido de estados de mar representativo del clima marítimo en aguas abiertas (Camus et al., 2011). Esta técnica es especialmente adecuada para capturar la variabilidad del clima marítimo con un número limitado de casos, manteniendo la representatividad estadística del conjunto completo de datos.

El método MaxDiss selecciona casos que maximizan la disimilitud entre sí, asegurando que el conjunto represente adecuadamente toda la variabilidad de condiciones de oleaje presentes en la serie histórica de datos GOW offshore.

Una vez seleccionados los casos representativos, se realiza la propagación del oleaje desde el punto GOW offshore hasta los puntos de interés en la playa utilizando el Modelo de Propagación de Oleaje y Corrientes (OLUCA), incluido en el Sistema de Modelado Costero (SMC) de IHCantabria (Quetzalcóatl et al., 2019). El modelo OLUCA es capaz de simular los procesos físicos de refracción, difracción, reflexión, asomeramiento, disipación de energía por fricción y rotura.

El modelo resuelve la forma parabólica de la ecuación de pendiente suave (Mild Slope) e incorpora modelos de propagación no lineales, simulación de capa límite turbulenta o laminar, y considera la rugosidad del fondo, entre otros factores. El modelo ha sido desarrollado inicialmente en la Universidad de Delaware, U.S.A. y mejorado posteriormente entre miembros de la citada Universidad y del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

Tras la propagación de los casos seleccionados, se establecen relaciones de transferencia entre las condiciones offshore y costeras basadas en los resultados del modelado numérico. Estas relaciones permiten reconstruir la serie histórica completa en los puntos costeros de interés aplicando las funciones de transferencia obtenidas a toda la serie temporal de datos GOW offshore.

La aplicación del downscaling híbrido resulta en eficiencia computacional, dado que evita tener que modelar toda la serie histórica reduciendo significativamente los costos computacionales, mantiene las características estadísticas del clima marítimo mediante la selección de casos representativos, permite generar series temporales en múltiples puntos costeros simultáneamente

Modelado numérico

Las imágenes a continuación muestran las mallas propuestas para el área de estudio, en función del abanico de direcciones del oleaje incidente, ya que por requerimiento del OLUCA, una de las alineaciones de la malla ha de coincidir con la dirección de propagación del oleaje, o estar comprendida en un ángulo no superior a 45º respecto a dicha dirección.

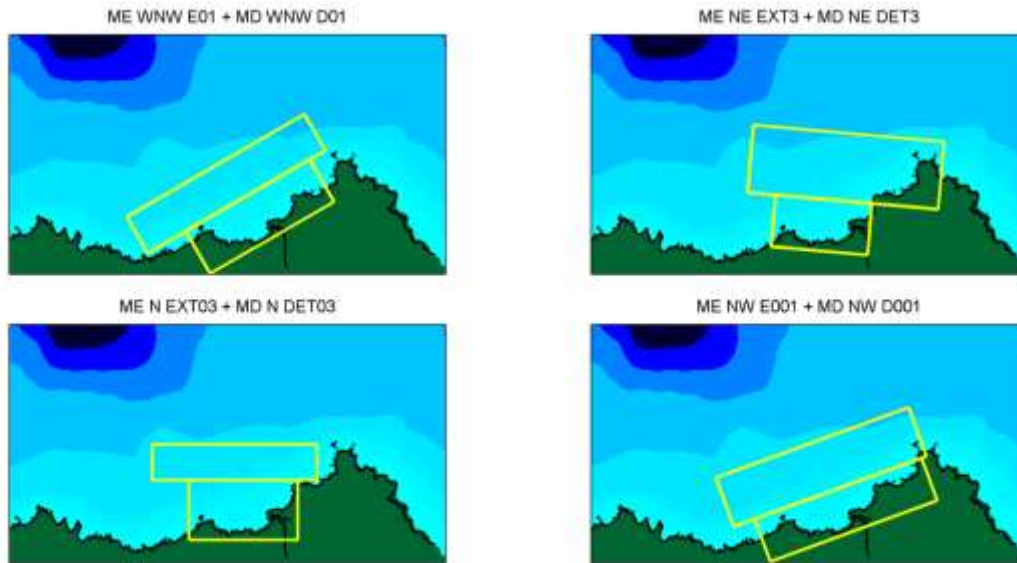


Ilustración 38: Mallas propuestas para la propagación del oleaje

En la tabla a continuación se observan las características de las mallas exteriores y de detalle, siendo $\delta x_1/x_2$ el tamaño de la celda y θ la orientación de la malla. Las mallas exteriores tuvieron una separación de 50 m y las de detalle, de 25 m.

mallla 1	δx_1 (m)	$\theta_{\text{mallla}}^\circ$	mallla 2	δx_2 (m)
ME WNW E01	50.00	-60.00	MD WNW D01	25.00
ME NE EXT3	50.00	-95.00	MD NE DET3	25.00
ME N EXT03	50.00	-90.00	MD N DET03	25.00
ME NW E001	50.00	-70.00	MD NW D001	25.00

Tabla 7: Características de las mallas propuestas

La serie de casos seleccionados ha sido propagada empleando la batimetría producto de la combinación de las batimetrías generales y de detalle de la playa (septiembre de 2024) mencionadas en el apartado anterior.

Con las mallas propuestas, se propagaron 150 casos (puntos rojos en Ilustración 39) de la serie completa (puntos grises de esa misma figura), cuya distribución y rangos de valores de los distintos parámetros de oleaje pueden observarse en la siguiente figura. Estos oleajes se han propagado para tres niveles de marea: en pleamar, media marea y bajamar.

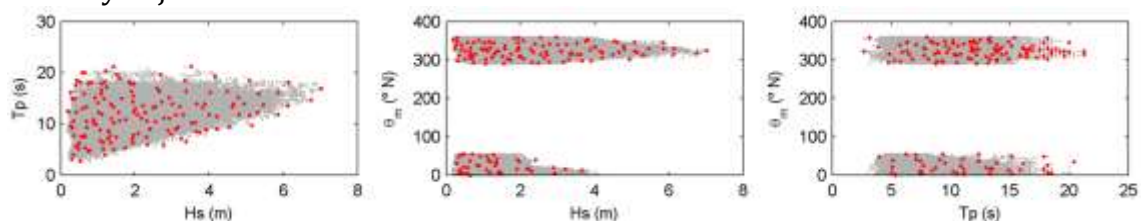


Ilustración 39: Selección de casos representativos. Primera figura de izquierda a derecha: relación período pico – altura significativa. Segunda figura: relación dirección – altura significativa. Tercera figura: relación dirección – período pico.

En el Anexo I se presentan las gráficas de alturas correspondientes a oleajes medios anuales y temporales para las seis direcciones (WNW, NW, NNW, N, NNE, NE) con la configuración batimétrica actual (agosto 2024) en pleamar y bajamar centradas en la zona de estudio. En la Tabla 8 se muestran las características de los citados oleajes. Los valores de Hs correspondientes a oleajes medios se han obtenido del procesamiento de los datos de la serie histórica tomando el Hs 50%, mientras que los oleajes de temporal se tomaron de los valores de Hs 12% para cada dirección. Los períodos se obtuvieron de la función de densidad conjunta de altura significativa y período de pico Hs-Tp en el punto GOW.

Dirección	Oleajes medios		Oleajes de temporal	
	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)
WNW	1.33	11	3.98	17
NW	1.59	11	5.46	17
NNW	1.41	11	5.72	18
N	1.12	11	3.94	17
NNE	0.99	10	3.33	14
NE	1.04	10	2.20	14

Tabla 8: Características de oleajes representativos de las condiciones medias y extremas off-shore.

Resultados de la propagación del oleaje

En las imágenes a continuación se incluyen los resultados de los temporales del NE, NW, y WNW en el caso de bajamar. El resto de las salidas para las otras direcciones, como así también para el caso de pleamar, se pueden encontrar en el anexo a este informe. En líneas generales, se observa que el comportamiento no varía entre bajamar y pleamar.

- Oleajes del NNW y NW (Ilustración 40 e Ilustración 41): En temporales, el oleaje mantiene su altura hasta la isobata de aproximadamente 10m (rojo intenso). Desde allí hasta la isobata de 6 m aproximadamente, el oleaje mantiene una altura de 3.5 m. La franja amarilla que se observa en el mapa de propagación corresponde a una altura de ola de 3 m y se encuentra sobre la isobata de 5.5m, mientras que la franja verde se extiende desde allí hasta los 2 m (Hs=2 m). Desde allí hacia tierra, la altura de ola disminuye a 0.5 m. La configuración batimétrica al oeste del área de estudio, específicamente al este de Cabo Vidrias (A en la ilustración), ejerce una influencia relevante sobre la distribución espacial del oleaje incidente. Los bajos marinos del Petón (B) y Los Anuales (C) actúan como estructuras de protección natural que atenúan significativamente la energía del oleaje, creando una zona de sombra donde las alturas de ola se reducen considerablemente hasta valores de 2-3 m.

Sin embargo, esta misma configuración batimétrica genera efectos de difracción que redistribuyen la energía del oleaje hacia sectores específicos de la costa. El proceso de difracción en torno a los bajos del Petón y Los Anuales produce una convergencia energética en el área de punta La Peñona (D), donde las alturas de ola experimentan una amplificación hasta alcanzar

5 m, representando un incremento significativo respecto a las condiciones de oleaje no perturbado.

De manera similar, el bajo de Aguín (E) modifica el patrón de propagación del oleaje en el sector oriental de la playa, generando un fenómeno de concentración energética que se manifiesta en alturas de ola del orden de 5 m en las proximidades del extremo este del espigón. Esta concentración del oleaje en el flanco oriental contrasta marcadamente con las condiciones más moderadas que prevalecen en los sectores protegidos por las estructuras topográficas submarinas del oeste.

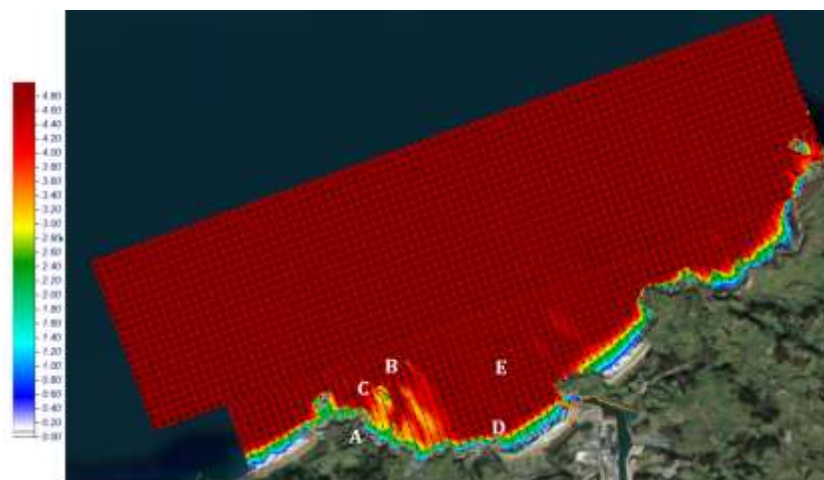


Ilustración 40: Temporal NW, $H_s=5.46\text{m}$. $T_p=17$ segundos. Bajamar

En cuanto a las condiciones medias, el mapa revela un campo de oleaje caracterizado por una distribución relativamente homogénea en la mayor parte del dominio, con alturas de ola predominantemente en el rango de 1.4 a 1.8 m, representadas por los tonos cian y turquesa que dominan la imagen. Esta configuración indica condiciones medias estables donde el oleaje mantiene características uniformes en aguas profundas, sin perturbaciones significativas que alteren su propagación regular hacia la costa.

En las proximidades de los accidentes geográficos costeros se observan variaciones cromáticas que indican alteraciones en las alturas de ola, pasando a tonos azules más intensos que corresponden a valores entre 1.0 y 1.4 m.

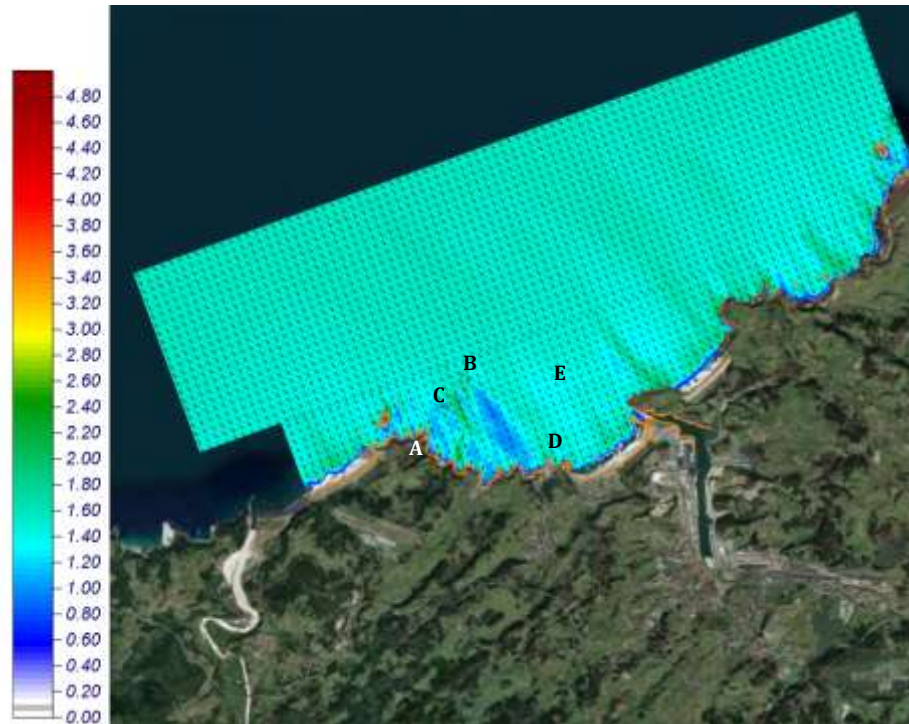


Ilustración 41: Condiciones medias NW, $H_s=1.59m$. $T_p= 11$ segundos. Bajamar.

- Oleaje del NNE y NE: Los temporales del NNE y NE tienen una intensidad mucho menor comparada a los temporales del NW. Esta menor intensidad se refleja en los mapas de oleaje de las imágenes a continuación. Debido a los efectos de refracción y la difracción en la punta Forcada (F en Ilustración 42 e Ilustración 43), el oleaje que alcanza la zona de estudio se ve reducido a 1.8-2 m en la zona frente a Playa Salinas, y a 1 m en el sector frente a El Espartal, al encontrarse en la zona más protegida por la Punta. En condiciones medias, se observa una disminución generalizada del oleaje a medida que se acerca a la costa, y los efectos de difracción en la punta Forcada se ven más atenuados, encontrando una altura de ola similar frente a playa Salinas y a El Espartal, de alrededor de 0.6m- 0.8m.

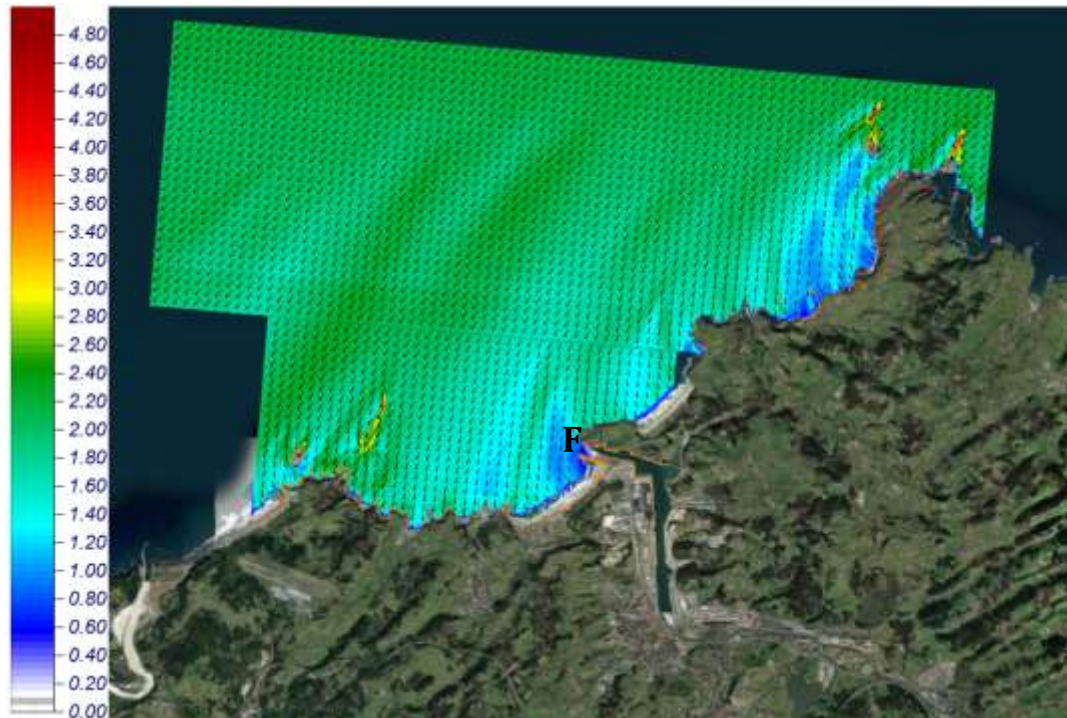


Ilustración 42: Temporal NE, $H_s=2.20\text{m}$. $T_p=14$ segundos. Bajamar

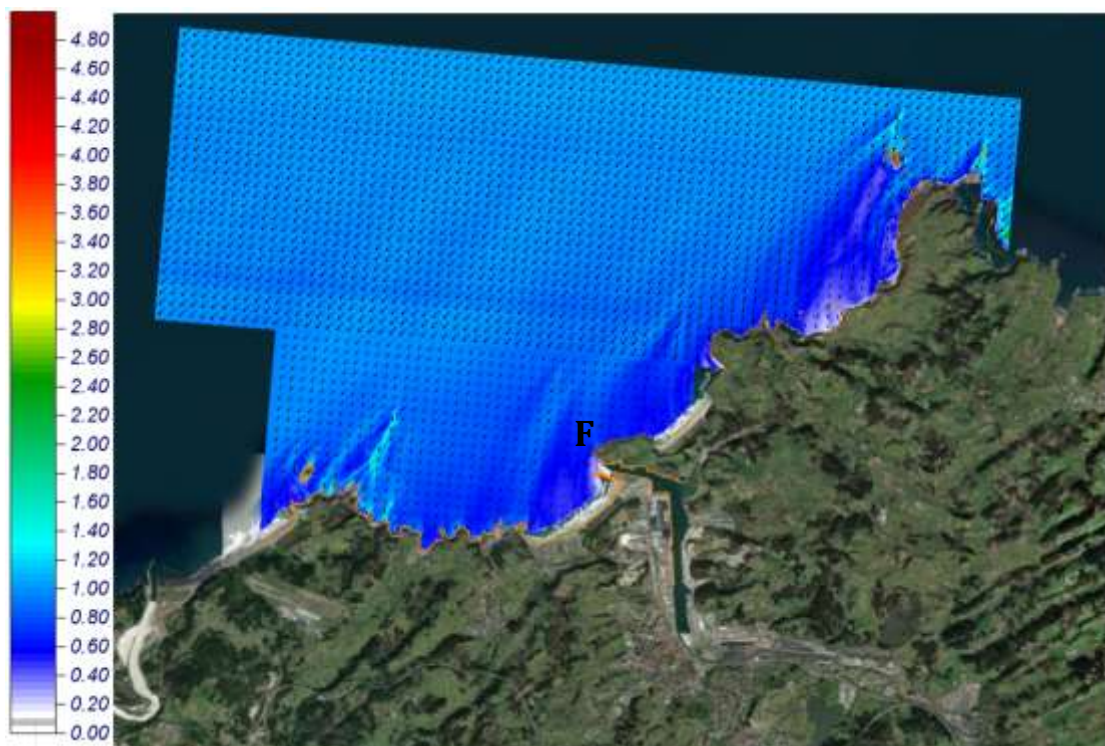


Ilustración 43: Condiciones medias NE, $H_s=1.04\text{m}$. $T_p=10$ segundos. Bajamar

- Oleaje del WNW (Ilustración 44 e Ilustración 45): Nuevamente se observa como en la zona del bajo El Petón (B) se produce una disminución brusca del oleaje por procesos de difracción, pasando de 4m a aproximadamente 2m de altura de ola. Esta transformación no llega a influir en la zona de estudio, en la que el oleaje incide con una altura de 4m hasta alcanzar la zona de rotura. En condiciones medias el comportamiento es el mismo, con alturas de ola incidentes de 1.30 m y disminuidas por procesos de difracción a 0.6m en la zona del bajo El Petón (B).

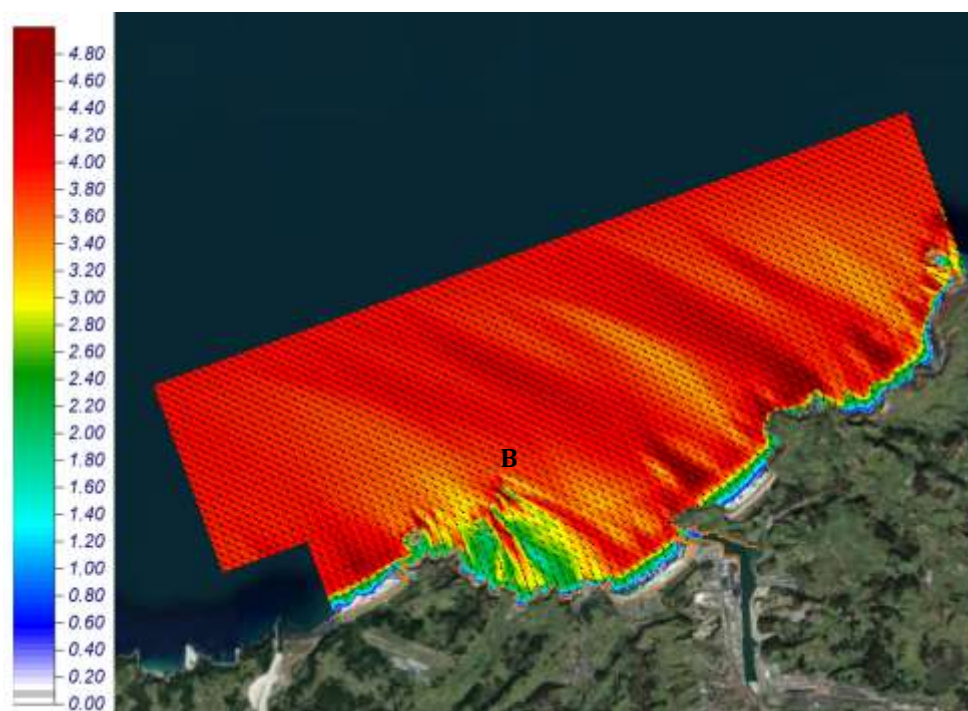


Ilustración 44: Temporal WNW, $H_s=3.98\text{m}$. $T_p= 17$ segundos. Bajamar



Ilustración 45: Condiciones medias WNW, $H_s=1.33\text{m}$. $T_p= 11$ segundos. Bajamar.

Como resultado de las propagaciones de las condiciones de clima medio y extremo, dadas por los valores de Hs 50% y Hs 12% respectivamente, se ha observado que la las dinámicas de la zona de estudio están fuertemente condicionadas por la presencia de bajos que favorecen la concentración del oleaje en sectores específicos de la costa, así como por la batimetría local de la playa Salinas – El Espartal, caracterizada por barras y canales. Esta combinación de factores genera gradientes de altura de ola a lo largo de la playa. Dicho gradiente influye sobre el sistema de corrientes litorales y, en consecuencia, sobre el modelo de funcionamiento de la playa. Asimismo, se observa que el comportamiento del oleaje es muy similar tanto en bajamar como en pleamar. Por ejemplo, en la imagen a continuación se compara el caso de pleamar y bajamar para un temporal del WNW. Cabe mencionar que, en pleamar, el nivel de agua llega a pie de duna.

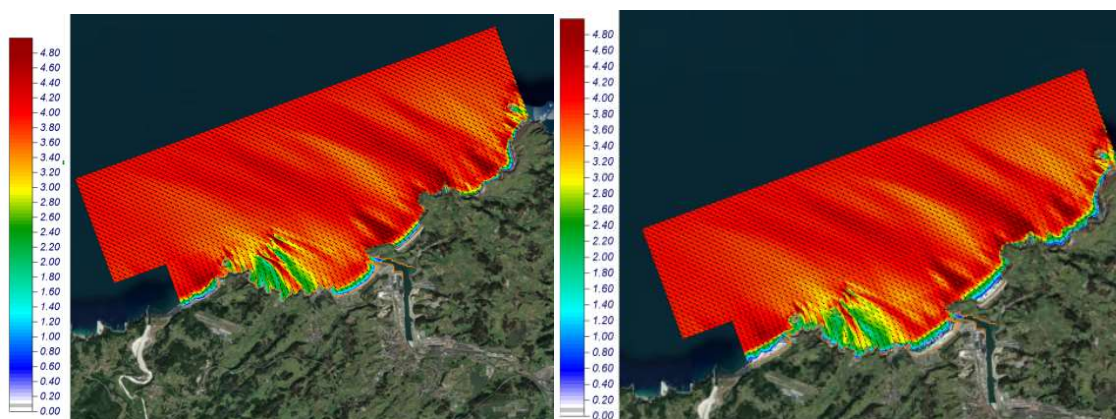


Ilustración 46: Comparación de las salidas del modelo para un temporal del WNW, Hs=3.98m. Tp= 17 segundos. Pleamar (imagen izquierda) y Bajamar (imagen derecha).

5.1.3 Flujos medios de energía

La morfología costera no responde de manera inmediata a las variaciones direccionales del oleaje, sino que tiende a adoptar una configuración de equilibrio dinámico que refleja las condiciones energéticas promedio del oleaje incidente. Esta respuesta morfológica se caracteriza mediante el concepto de flujo medio anual de energía $\bar{F}_m$, que representa la energía disponible para los procesos de transporte sedimentario a lo largo de la costa.

El flujo instantáneo de energía del oleaje en cualquier ubicación específica está definido por el vector $\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j}$, cuya orientación corresponde a la dirección de propagación del tren de ondas y cuya magnitud está determinada por la expresión $(1/8)\rho g H^2 C_g$, siendo C_g la velocidad de grupo y H la altura significativa de ola.

Para obtener el flujo energético medio anual, es necesario integrar temporalmente todos los flujos instantáneos registrados durante un ciclo anual completo. Considerando que durante cada hora del año se presenta un flujo energético $F_{x,t} \vec{i} + F_{y,t} \vec{j}$, el flujo medio anual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{F}_m = \frac{1}{8760} \sum_{t=1}^{8760} F_{x,t} \vec{i} + \sum_{t=1}^{8760} F_{y,t} \vec{j}$$

Esta integración temporal puede expresarse en términos de sus componentes:

$$\vec{F}_m = \vec{F}_x \vec{i} + \vec{F}_y \vec{j}$$

La orientación resultante del flujo medio de energía queda definida por el ángulo:

$$\overline{\theta}_m = \arctan\left(\frac{\overline{F}_y}{\overline{F}_x}\right)$$

En la imagen a continuación se observa la ubicación de los puntos objetivo de la propagación del oleaje que se realizó con el SMC, y en los cuales se calculó el flujo medio de energía.

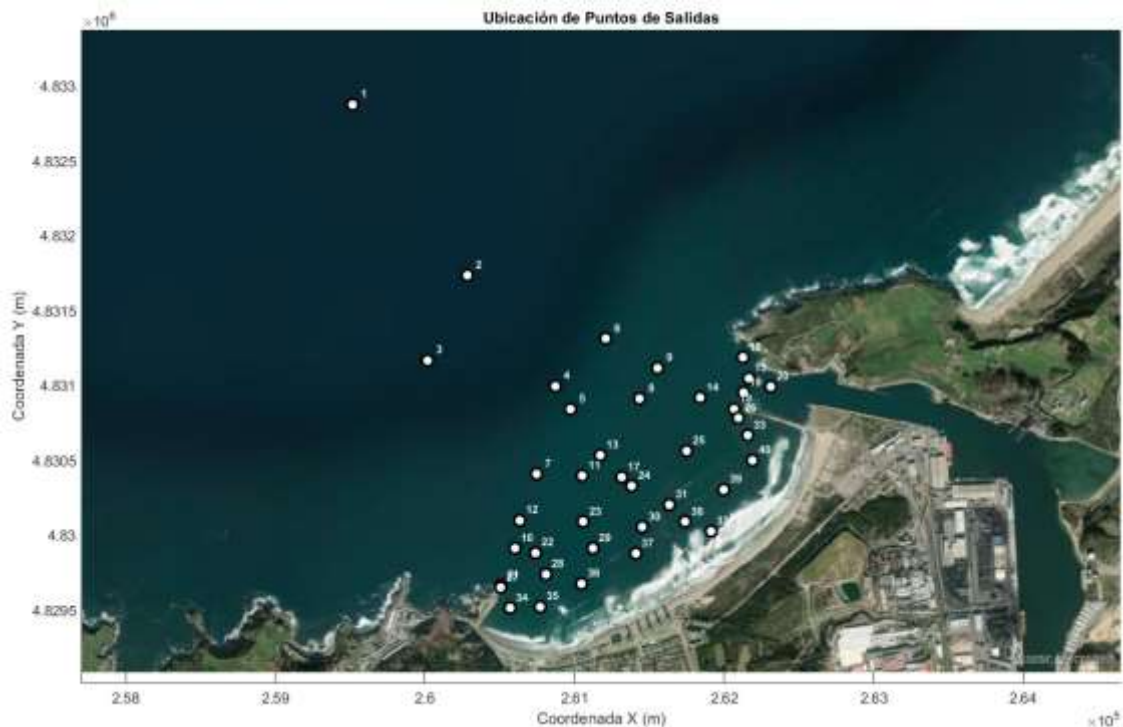


Ilustración 47: Ubicación de puntos objetivo

En la tabla a continuación se observan los resultados del cálculo del flujo medio de energía en cada uno de los puntos objetivo, mientras que en la Ilustración 48 se representan espacialmente.

Los puntos 1 y 2, ubicados en aguas profundas al norte de la zona de estudio, corresponden a posiciones donde el oleaje mantiene características oceánicas sin perturbaciones significativas por efectos topográficos. La transición hacia aguas intermedias está representada por los puntos 3 a 9, distribuidos siguiendo isobatas aproximadamente paralelas a la costa, mientras que la mayor densidad de puntos se concentra en la zona costera donde los procesos de transformación del oleaje son más complejos.

La escala cromática revela un gradiente energético marcado desde las posiciones oceánicas hacia la costa. Los puntos en aguas profundas muestran valores de flujo de energía en el rango superior de la escala, representados por tonos blancos y amarillos que indican flujos superiores a $3.5 \times 10^4 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s})$. Esta alta disponibilidad energética en aguas profundas refleja la ausencia de procesos disipativos significativos y la preservación de las características energéticas del oleaje oceánico.



Conforme se avanza hacia la costa, se observa una transición progresiva hacia valores energéticos menores, evidenciada por el cambio cromático hacia tonos naranjas y rojos que corresponden a flujos entre 1.5×10^4 y 3.0×10^4 J/(m·s). Esta reducción energética está asociada a procesos de fricción de fondo, rotura del oleaje y efectos disipativos característicos de la zona de transformación costera.

La zona costera presenta la mayor heterogeneidad en los valores de flujo de energía, con variaciones significativas entre puntos adyacentes que reflejan efectos topográficos locales. Los puntos ubicados en sectores protegidos por accidentes geográficos, como punta La Peñona (puntos 21, 27, 34 y 35) muestran valores energéticos considerablemente menores, representados por tonos rojizos en la escala cromática, mientras que posiciones expuestas mantienen flujos energéticos más elevados (puntos 30 y 31).

En cuanto a las direcciones del flujo medio de energía (FME) en los 40 puntos de estudio, se observa un patrón direccional definido, pero con variaciones espaciales, que reflejan la influencia de la batimetría local sobre la propagación del oleaje. Hay un claro dominio del nor-noroeste, reflejado en la orientación de la playa, entorno a una dirección media en torno a los 327° .

En la zona de aguas profundas las direcciones se mantienen dentro del rango 325° - 327° , pero a medida que se propaga hacia la costa hay una ligera rotación producto de procesos de refracción. La batimetría irregular genera desviaciones en varios puntos, como por ejemplo el punto 34 ubicado a la sombra de La Peñona, que tiene una dirección de casi 355° (prácticamente norte), por efectos de difracción. En el sector oriental, se destacan los puntos 10, 15 y 20, con direcciones de 306° , 314° y 304° respectivamente (orientación WNW), tendiendo a alinearse con la dirección del canal al encontrarse a resguardo de Punta La Forcada. Finalmente, en el sector central la dirección es la predominante, ya que es un punto alejado de los accidentes topográficos, y por lo tanto la influencia en la propagación del oleaje es menor.

Id	x(m)	y(m)	z(m)	FME (J/(ms))	Dir.	Id	x(m)	y(m)	z(m)	FME (J/(ms))	Dir.
poi01	259516.3	4832873.47	36.86	40191.53	325.9	poi21	260508.09	4829661.51	4.25	20515.18	340.49
poi02	260283.59	4831733.87	30	38207.79	326.62	poi22	260738.77	4829878.22	7.31	26612.83	329.62
poi03	260017.8	4831164.46	24.26	37312.49	326.86	poi23	261056.84	4830087.93	7.29	30745.25	327.15
poi04	260871.59	4830993.19	17.96	37116.02	327.68	poi24	261381.89	4830325.61	7.42	31419.51	327.29
poi05	260972.95	4830839.4	16.16	36652.01	328.06	poi25	261748.89	4830559.78	7.51	28814.43	325.74
poi06	261208.51	4831311.26	20.29	34393.33	327.56	poi26	262094.92	4830779.98	6.66	26780.09	325.75
poi07	260745.77	4830406	14.02	31651.77	327.49	poi27	260505.96	4829647.53	3.69	19927.94	341.75
poi08	261434.32	4830909.31	13.95	30386.18	327.94	poi28	260808.68	4829734.91	5.47	20534.18	329.66
poi09	261555.11	4831113.3	15.41	31761.07	327.35	poi29	261123.25	4829909.67	4.58	24706.74	328.6
poi10	262126.38	4831185.43	13.25	16959.84	306.89	poi30	261451.8	4830052.98	4.8	24122.22	327.31
poi11	261051.15	4830394.37	11.48	32214.9	328.07	poi31	261633.55	4830199.78	4.35	24067.67	326.37
poi12	260633.92	4830094.92	12.78	29416.84	328.27	poi32	261913.17	4830023.47	0.09	7067.88	326.76
poi13	261172.18	4830531.82	12.1	33521.14	327.96	poi33	262157.83	4830664.64	4.39	21662.13	321.17
poi14	261839.77	4830916.3	11.41	29695.35	327.21	poi34	260569.52	4829511.22	2.64	12662.81	354.82
poi15	262164.82	4831045.62	11.88	19109.38	314.6	poi35	260770.23	4829518.21	3	15460.2	334.4
poi16	260602.46	4829909.67	8.23	29301.25	332.39	poi36	261046.35	4829672	3.11	18366.8	328.52
poi17	261315.49	4830385.02	9.17	32572.15	327.45	poi37	261409.86	4829874.72	2.93	19010.37	328.15
poi18	262066.96	4830839.4	8.57	27509.95	327.31	poi38	261738.41	4830087.93	2.28	17681.58	321.7
poi19	262129.87	4830951.25	10.75	25603.08	324.24	poi39	261997.05	4830301.14	3	18590.11	326.78
poi20	262311.62	4830989.7	12.64	9421.57	304.69	poi40	262189.29	4830496.87	2.87	17204.26	320.99

Tabla 9: Valores del Flujo medio de energía en cada punto objetivo y su dirección.

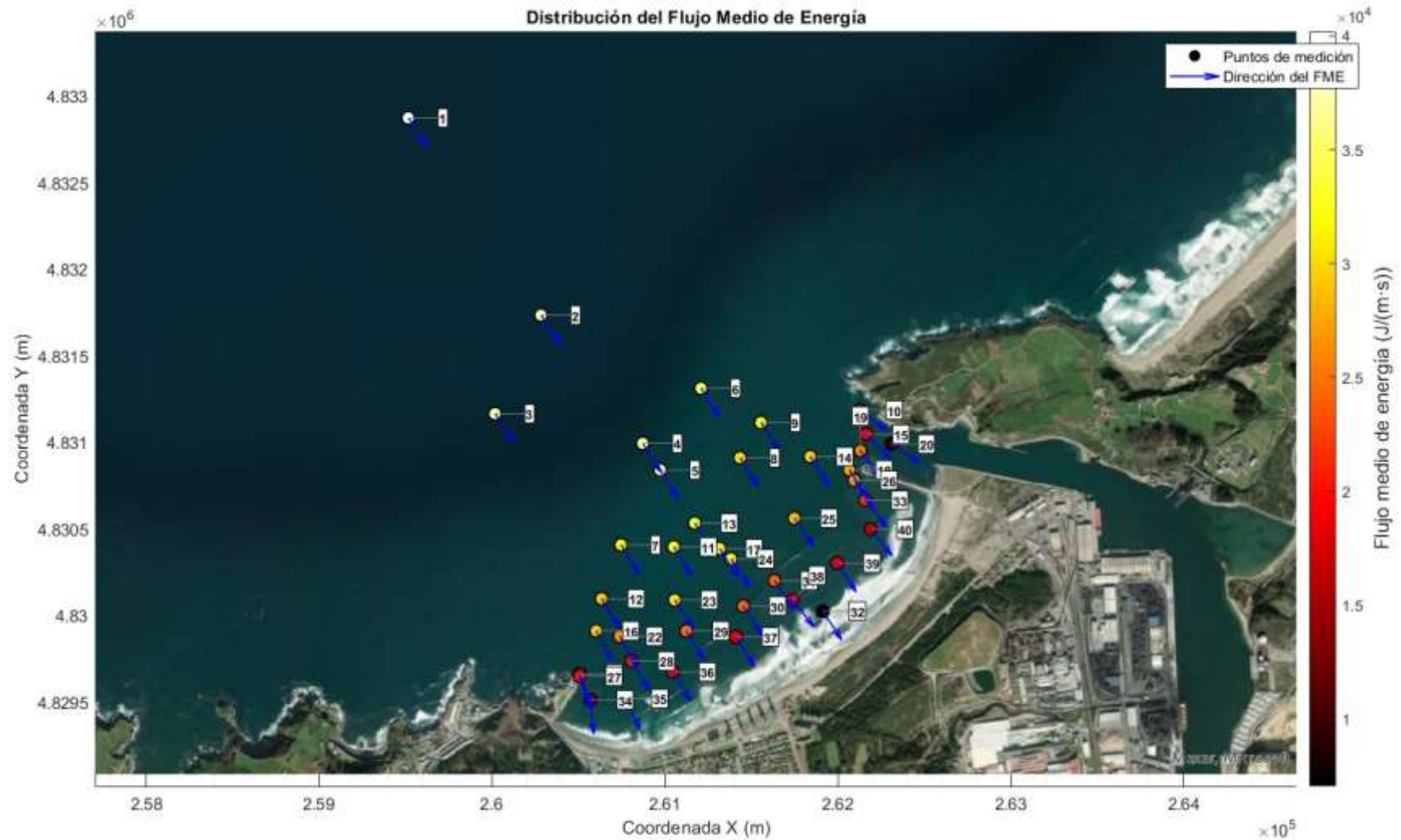


Ilustración 48: Flujo medio de energía en cada punto objetivo. Fuente: Elaboración propia

5.2 Sistema de corrientes

Las corrientes son el principal agente de transporte de sedimentos en el medio marino costero. Conocer sus patrones permite predecir dónde se producirá erosión, sedimentación o estabilidad sedimentaria, lo cual es esencial para comprender la evolución a largo plazo de las playas.

El gradiente de altura de ola origina flujos de agua que discurren principalmente de forma paralela a la línea de costa. Estos flujos dependen del ángulo de aproximación del oleaje hacia la orilla (corrientes de incidencia oblicua) y de las alturas de ola. Estas corrientes litorales se desarrollan en la zona donde las olas rompen y, por consiguiente, en un sector donde los sedimentos quedan en estado de suspensión y pueden ser fácilmente desplazados por la acción de dichos flujos.

Por tanto, para que una configuración litoral determinada mantenga su estabilidad, es preciso que no se generen corrientes litorales o que, en caso de existir, el gradiente de transporte sedimentario que producen sea equilibrado (el material erosionado en un sector es compensado por el aporte procedente de otro, estableciéndose así un sistema de circulación cerrado).

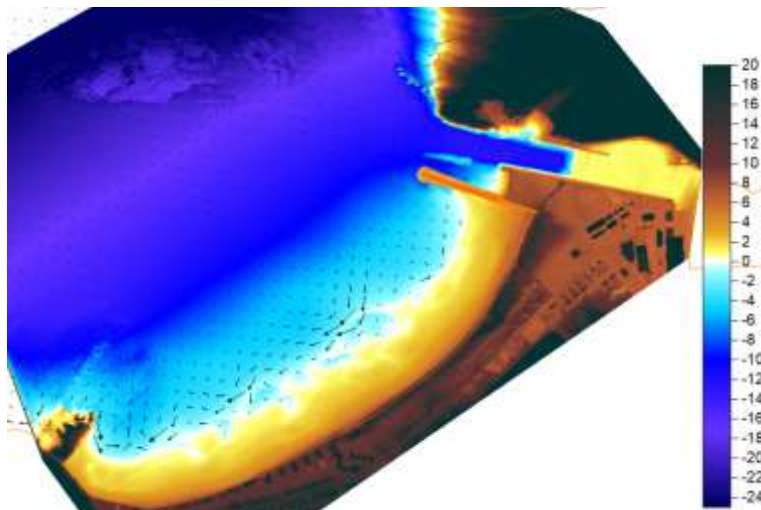
En este trabajo se ha empleado el modelo COPLA para el cálculo de corrientes vinculadas a la ruptura del oleaje, el cual se integra dentro del Sistema de Modelado Costero (SMC, Quetzalcóatl et al., 2019) desarrollado por IHCantabria.

En esencia, respecto a las corrientes por rotura, este modelo establece el tensor de radiación del oleaje basándose en los resultados de altura e incidencia obtenidos durante la propagación descrita en el punto anterior, calculando posteriormente el campo de corrientes y elevaciones del nivel mediante un modelo no lineal que soluciona las ecuaciones integradas de Navier-Stokes.

Utilizando las propagaciones previamente descritas, se obtienen mediante COPLA los patrones de corrientes generados por dichos oleajes, tanto en condiciones medias como durante eventos de temporal.

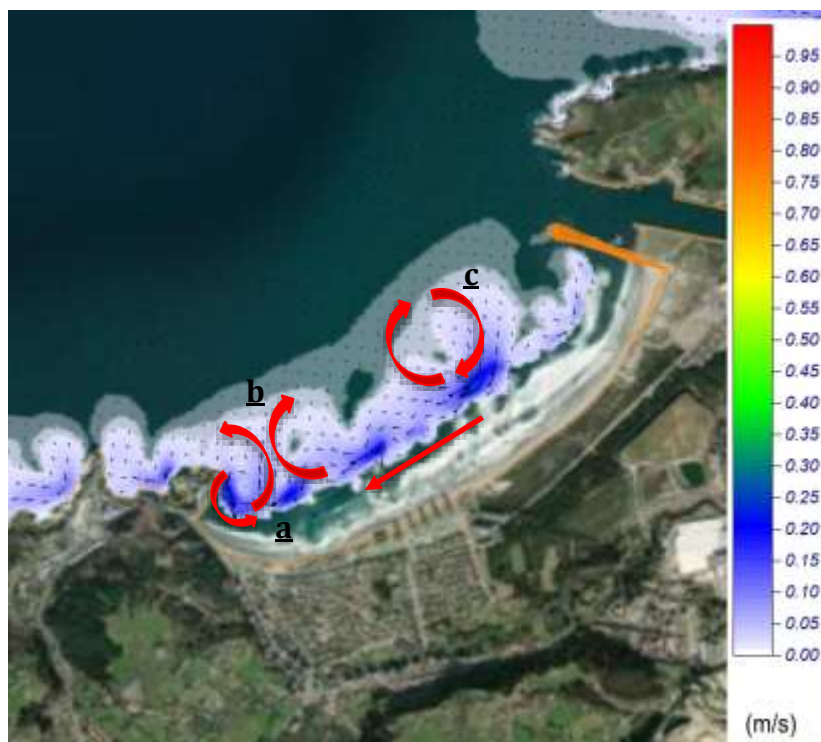
A continuación, se presentan los resultados obtenidos en relación con los patrones de circulación correspondientes a los escenarios establecidos en la Tabla 8. Es importante destacar que los resultados evidencian la estrecha relación existente entre los patrones hidrodinámicos y la batimetría de la playa.

Para ilustrar esta dependencia, la siguiente imagen muestra los patrones calculados para temporales del NE, utilizando la batimetría más reciente disponible (septiembre 2024), donde se ha superpuesto la información batimétrica. En estas representaciones se puede apreciar claramente cómo las circulaciones se ajustan y quedan condicionadas por las batimétricas del lecho, demostrando que la morfología submarina actúa como un factor controlador muy importante en la configuración de los flujos costeros.



*Ilustración 49: Patrones de corrientes generados por los temporales del NE en bajamar.
Hs=2.20 Tp=14s, con batimetría de 2024.*

- **Oleaje del NE:** La imagen a continuación corresponde a la salida del modelo para el caso de temporales del NE, con una Hs de 2.20 m y período pico de 14 segundos. Se puede observar en tono azul más oscuro, las zonas donde se obtienen las mayores intensidades de corriente en torno a los 0.25 m/s. La dirección es preponderantemente de este a oeste, con un bucle en sentido antihorario en la zona de La Peñona (a), que concurre con otro bucle en sentido horario formado frente a playa Salinas, generando corrientes de retorno (b). Frente a la Playa El Espartal, se produce también un vórtice en sentido horario (c)



*Ilustración 50: Patrones de corrientes generados por los temporales del NE en bajamar.
Hs=2.20 Tp=14s.*

En condiciones medias (figura a continuación), los patrones descritos anteriormente se diluyen, obteniendo sólo velocidades máximas de corriente de alrededor de 0.05 / 0.1 m/s.

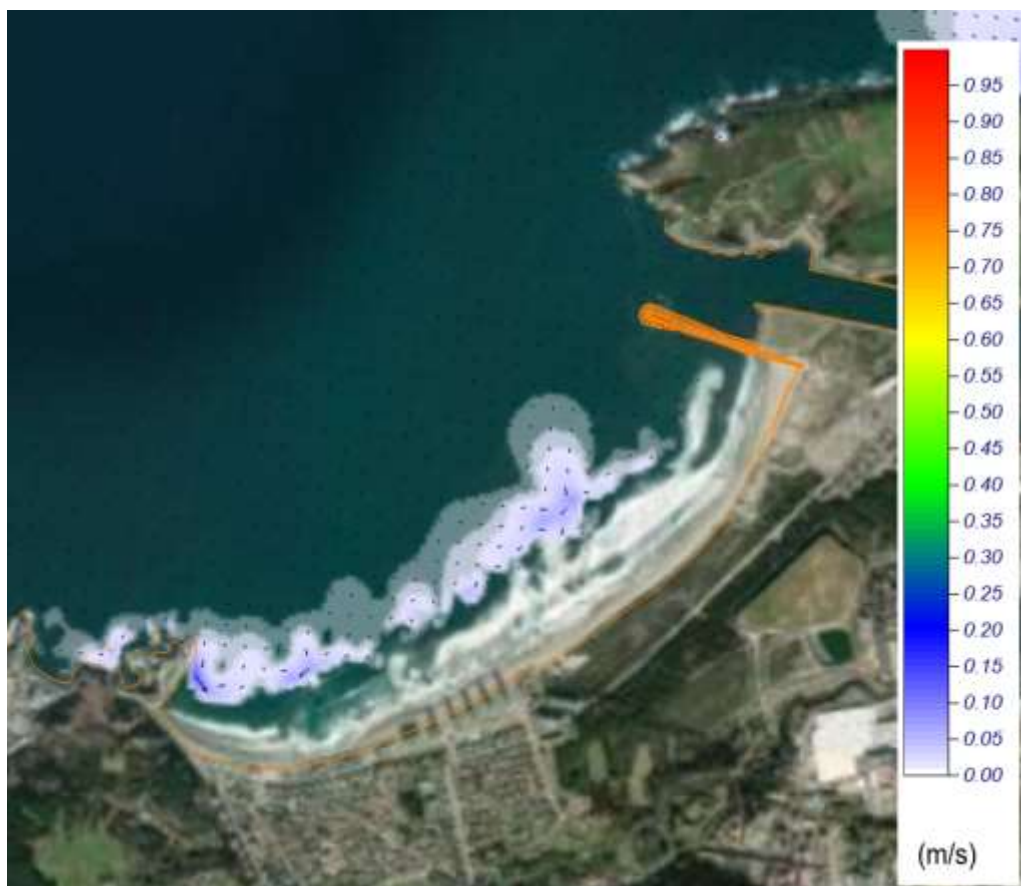
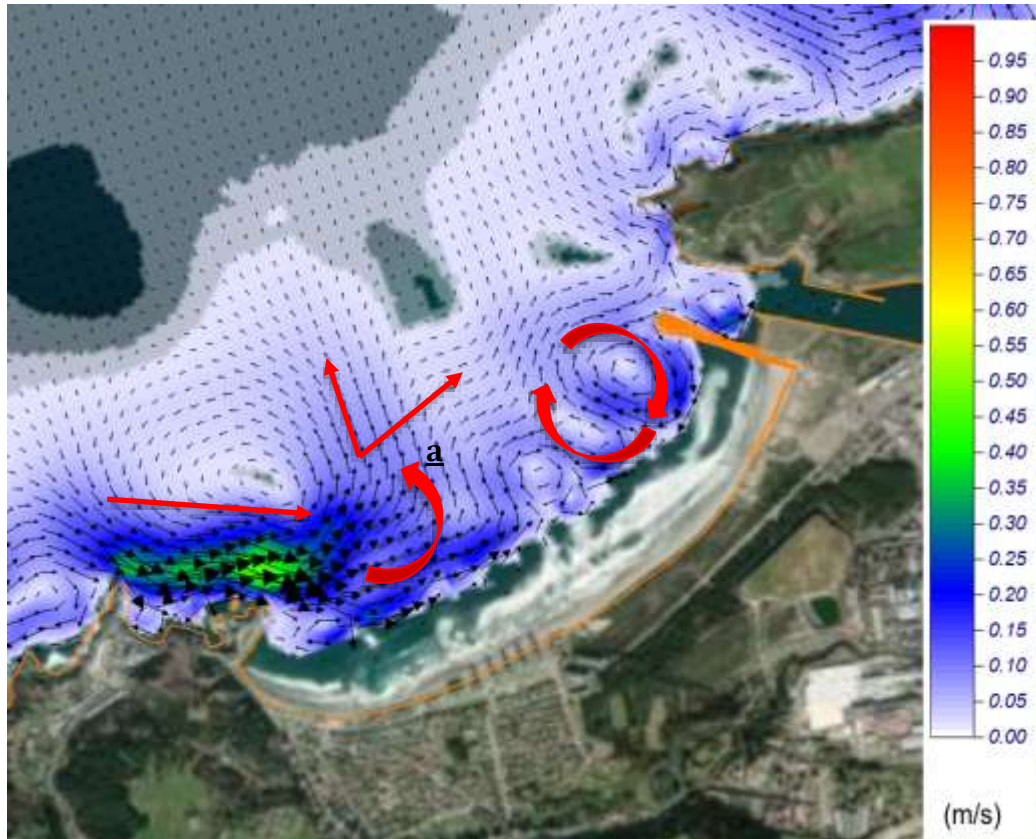


Ilustración 51: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NE en bajamar. $H_s=1.04$ $T_p=10s$.

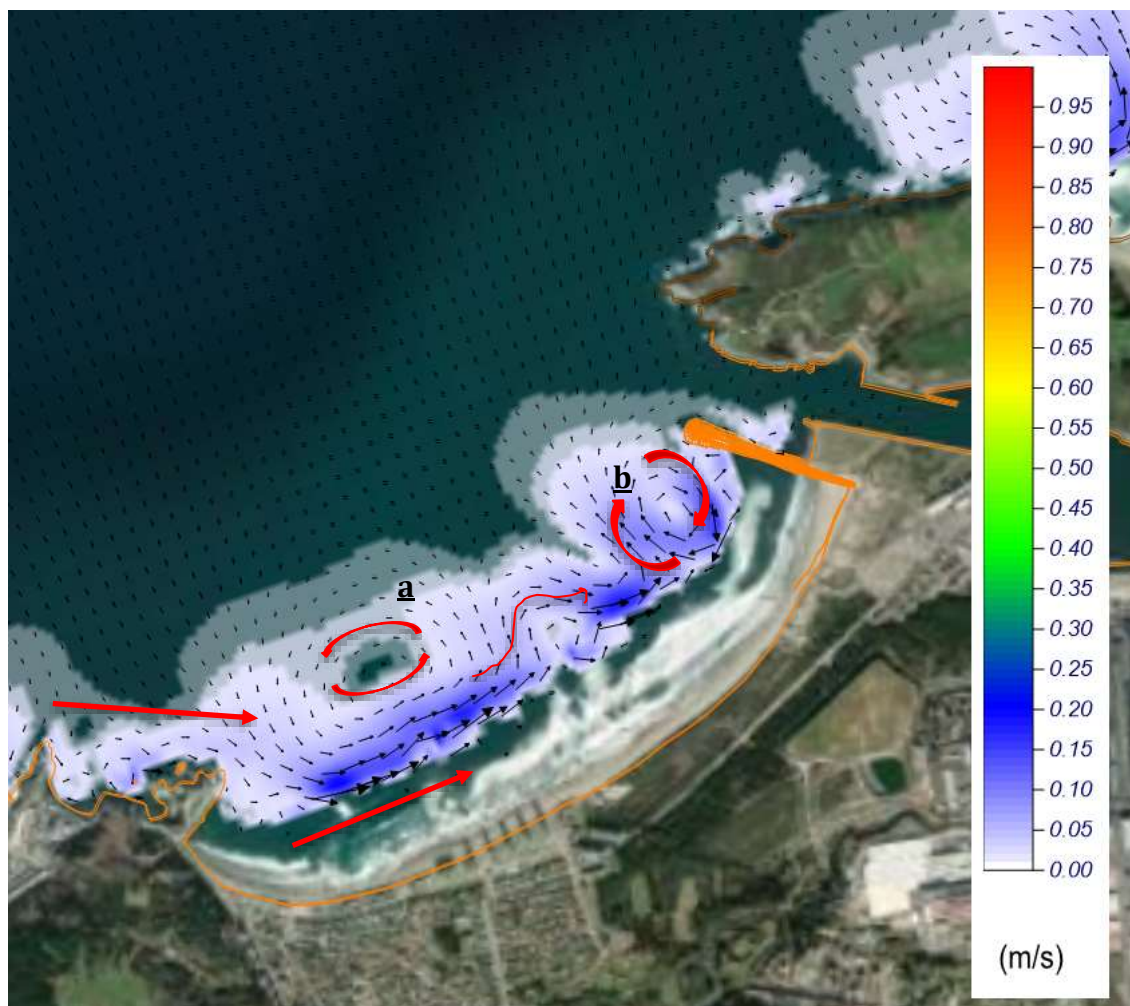
- Oleaje del NW: Esta dirección, que es la de mayor probabilidad de ocurrencia, genera una concentración del flujo con aumento de intensidad en la zona de La Peñona, que induce una corriente hacia la playa, que, en la zona central, se transforma en una corriente de salida hacia aguas profundas (a), y en otra en sentido paralelo a la playa. Asimismo, en la zona del espigón, se genera un bucle en sentido horario que alcanza una intensidad de 0.25 m/s. En condiciones medias, la concentración el flujo en la zona de La Peñona desaparece, y con ello, la componente longitudinal a la playa se vuelve menos intensa. El bucle identificado como (a) frente a Playa Salinas representa una estructura circulatoria anticiclónica de baja intensidad que emerge como resultado de la reducción en la componente longitudinal de las corrientes. La formación de este bucle está directamente relacionada con el debilitamiento de las corrientes longitudinales que, en condiciones más energéticas, impedirían el desarrollo de estructuras circulatorias transversales a la costa.

El bucle en sentido horario (b) en la zona del espigón se mantiene, aunque con una intensidad menor (0.1 m/s).

La distribución general de velocidades en condiciones medias presenta una notable homogenización comparada con estados más energéticos, con una transición gradual entre zonas de diferentes intensidades en lugar de los gradientes abruptos característicos de condiciones más dinámicas. La mayor parte del dominio marino presenta velocidades en el rango de 0.05 a 0.2 m/s.



*Ilustración 52: Patrones de corrientes generados por los temporales del NW en bajamar.
 $H_s=5.46$ $T_p=17s$.*



*Ilustración 53: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NW en bajamar.
 $H_s=1.59$ $T_p=11s$.*

- Oleaje del WNW: En temporales (Ilustración 54) la característica principal es la formación de un bucle con un núcleo claramente definido, y de gran extensión. Las proximidades de la línea de costa muestran corrientes intensificadas pero que no superan los 0.3-0.4 m/s, manteniendo la distribución cromática en tonos azules, y una dirección preponderante del oeste hacia el este (b). La zona del espigón genera perturbaciones locales del flujo que se manifiestan como pequeños vórtices secundarios en sentido horario (c).

En condiciones medias (Ilustración 55) el bucle de gran extensión acerca su centro a la costa (a), y la zona de mayores intensidades de flujo disminuye. Asimismo, la disminución en la intensidad induce la creación de una corriente de retorno (b) que se da por la conjunción de este vórtice, con el que se genera alrededor del espigón (c).

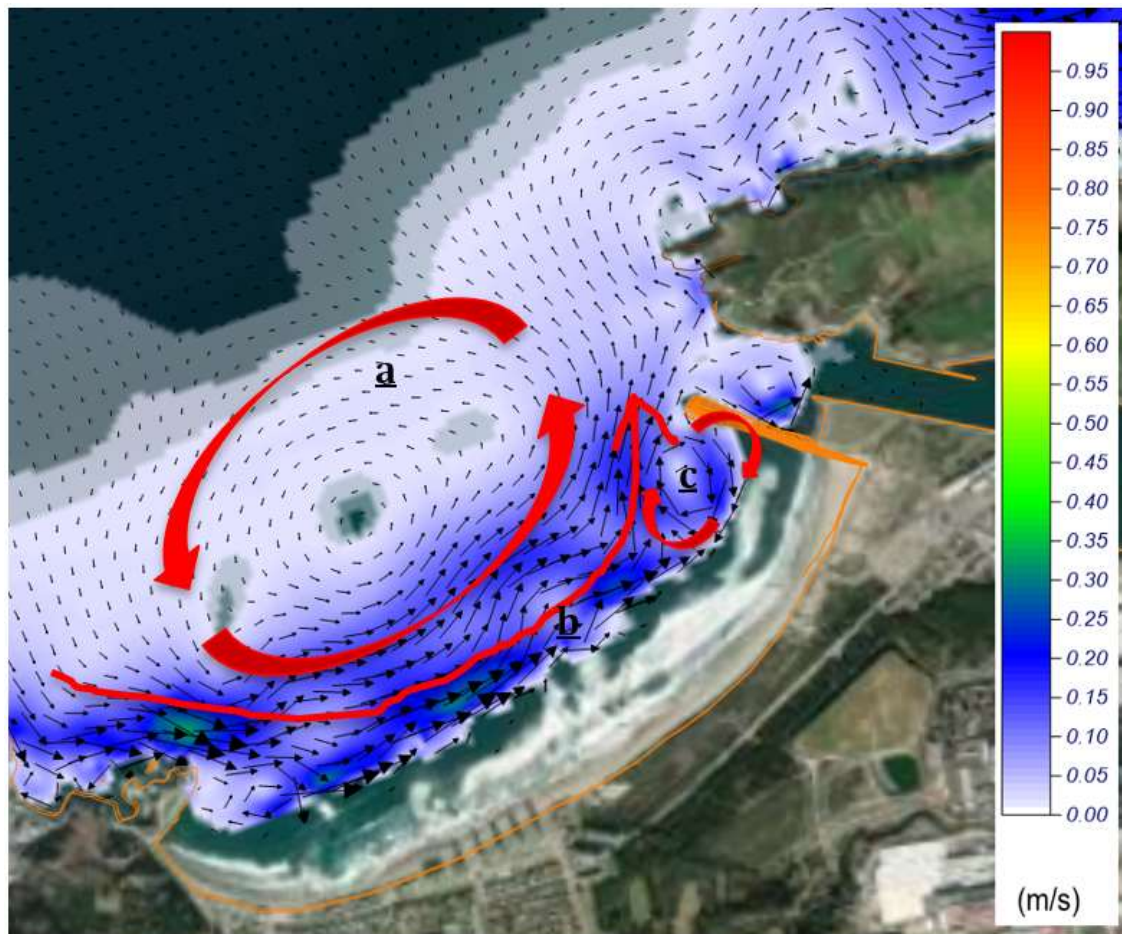


Ilustración 54: Patrones de corrientes generados por los temporales del WNW en bajamar. $H_s=3.98$ $T_p=17s$.



Ilustración 55: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del WNW en bajamar. $H_s=1.33$ $T_p=11s$.

6. BALANCE SEDIMENTARIO DE LA PLAYA

En este capítulo se analiza la evolución batimétrica anual y estacional de la playa Salinas. Se analizan las variaciones producidas en zonas de control planteadas por el CEDEX en sus estudios anteriores, las cuales se observan en la imagen a continuación. El polígono amarillo corresponde al área delimitada del canal de acceso, el polígono rojo corresponde a la playa seca, y, finalmente, el polígono azul corresponde a la playa completa.

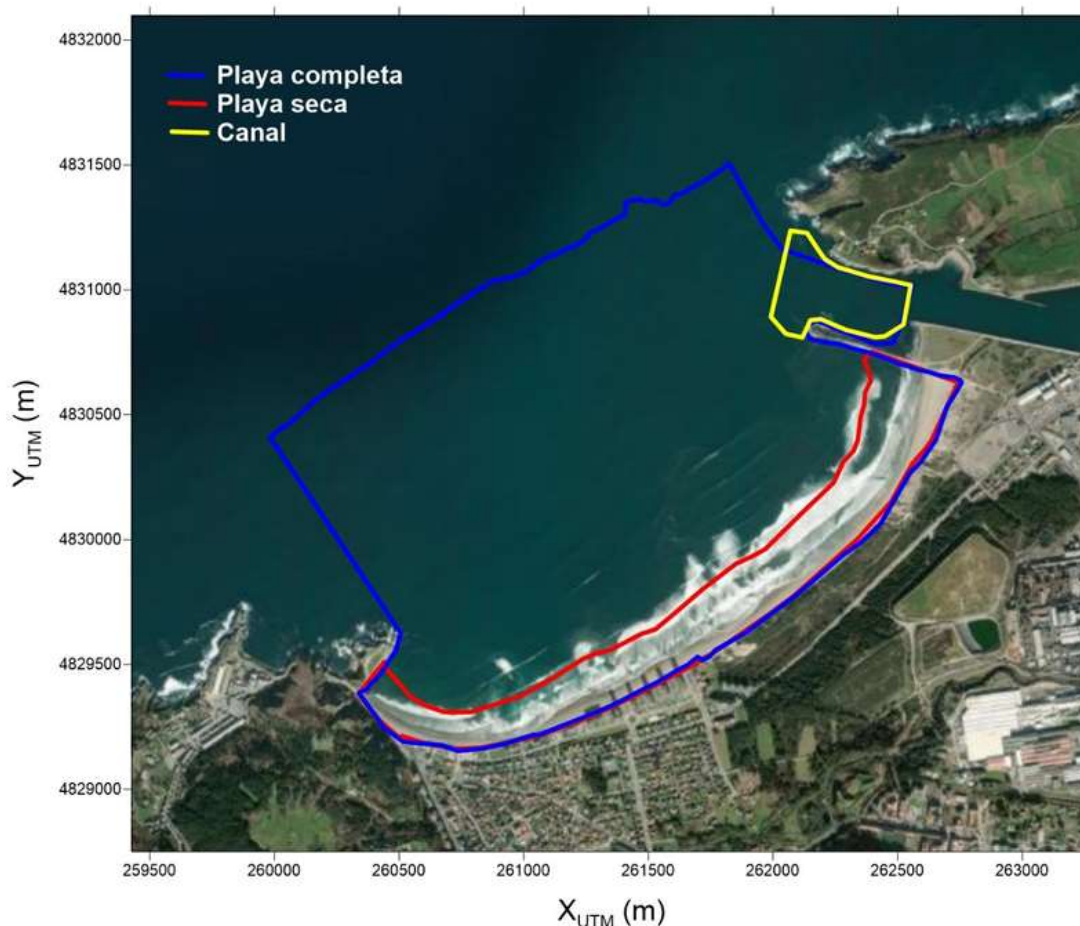


Ilustración 56: Zonas de control para el análisis de la evolución batimétrica

Las batimetrías disponibles para el análisis son las siguientes:

Año	Meses	
2001	Octubre	
2005	Abril	Septiembre
2006	Abril	Septiembre
2007	Septiembre	
2008	Abril	Octubre
2009	Mayo	Octubre
2011	Mayo	Octubre
2012	Mayo	Octubre
2013	Mayo	Septiembre

Año	Meses	
2014	Mayo	Agosto
2016	Mayo	
2019	Septiembre	
2021	Septiembre	
2022	Agosto	
2023	Marzo	Septiembre
2024	Mayo	Septiembre

Tabla 10: Batimetrías antecedentes disponibles

Para analizar la evolución batimétrica anual se tomará de base los siguientes levamientos realizados por el CEDEX (2011-2020) y por la APAV (2021-2024):.

Año	Mes
2001	Octubre
2005	Septiembre
2006	Septiembre
2007	Septiembre
2008	Octubre
2009	Octubre
2011	Octubre
2012	Octubre
2013	Septiembre
2014	Agosto
2016	Mayo
2019	Septiembre
2021	Septiembre
2022	Agosto

Tabla 11: Levantamientos utilizados para analizar la evolución batimétrica anual

6.1 Evolución de la playa completa

En la Ilustración 57 se muestra el balance sedimentario con la evolución de fondos (diferencias de cotas en metros) del conjunto de la playa entre septiembre de 2023 y septiembre de 2024. En la figura, los tonos cálidos (amarillo a rojo) representan acumulaciones de material, mientras que los tonos fríos (azul a verde) representan áreas de erosión. Con el fin de facilitar la lectura de los cambios, se han representado en gris las curvas de nivel de la batimetría de septiembre de 2023.

La mayor acumulación de sedimento se concentra principalmente en los alrededores de las cotas -1 y +1 metros, donde se detecta una acumulación máxima en sectores puntuales del centro de la playa de +2.65m (polígono rojo de rayas discontinuas), y desde la cota -4 hasta la -11, una acumulación de hasta +1.2 m de arena (polígono azul de línea continua). En cuanto a la playa seca, se aprecia un aumento del volumen de arena en la zona central y en algunas zonas del sector Oeste y Este de la playa (círculos verdes).

En cuanto a la erosión, puede observarse que es algo generalizada en la playa en todo el ancho de la playa a partir de la cota -1 metros hasta la cota -4 m, y en la playa seca en los sectores centrales, donde se observan pérdidas de arena de hasta 1 m (sectores indicados).

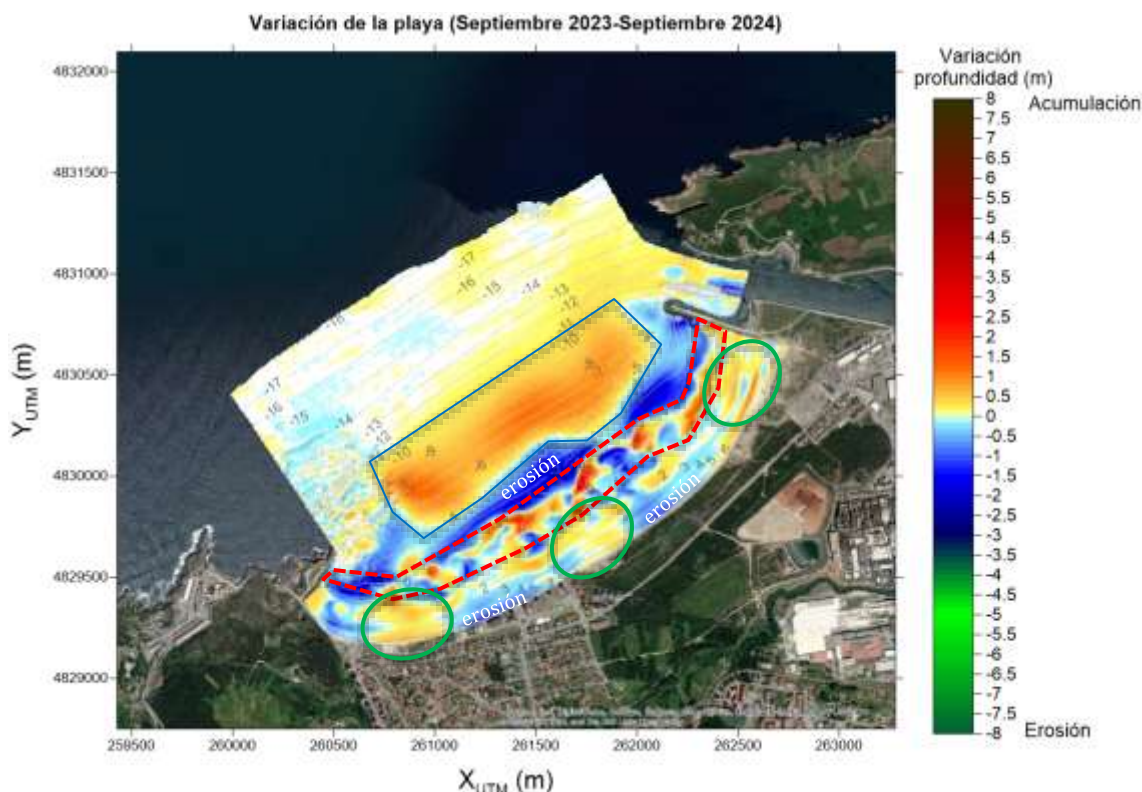


Ilustración 57: Topobatimetría septiembre 2023 y balance sedimentario septiembre 2023-septiembre 2024: Variación de cotas en el conjunto de la playa de Salinas entre septiembre 2023 y septiembre 2024 (Evolución anual). Diferencias de cotas en m.

La evolución seguida durante este periodo se ha dividido en dos tramos: otoño 2023-primavera 2024 y primavera 2024-verano 2024, representándose respectivamente en la Ilustración 58 y la Ilustración 59.

Como puede observarse en la siguiente imagen, la evolución otoño-primavera (septiembre de 2023 a mayo de 2024) es similar a la observada en el periodo anual (Ilustración 57), con grandes acumulaciones de arena en forma de barras entre las cotas 0 y -2 m (a) (acumulaciones de hasta 2.5m en la zona central), y alrededor del espigón (valores máximos de 1.3m aproximadamente).

En cuanto a la playa seca y cordón dunar, se aprecian acumulaciones de arena de hasta 0.6 m en el sector más occidental del tramo urbanizado de la playa (b), y de unos 1.3-1.5 m en el sector este (c). En el resto de la playa, se observan pérdidas de arena de entre 1.2 y 2 m en la parte alta del perfil de playa a partir de la cota +2 m.

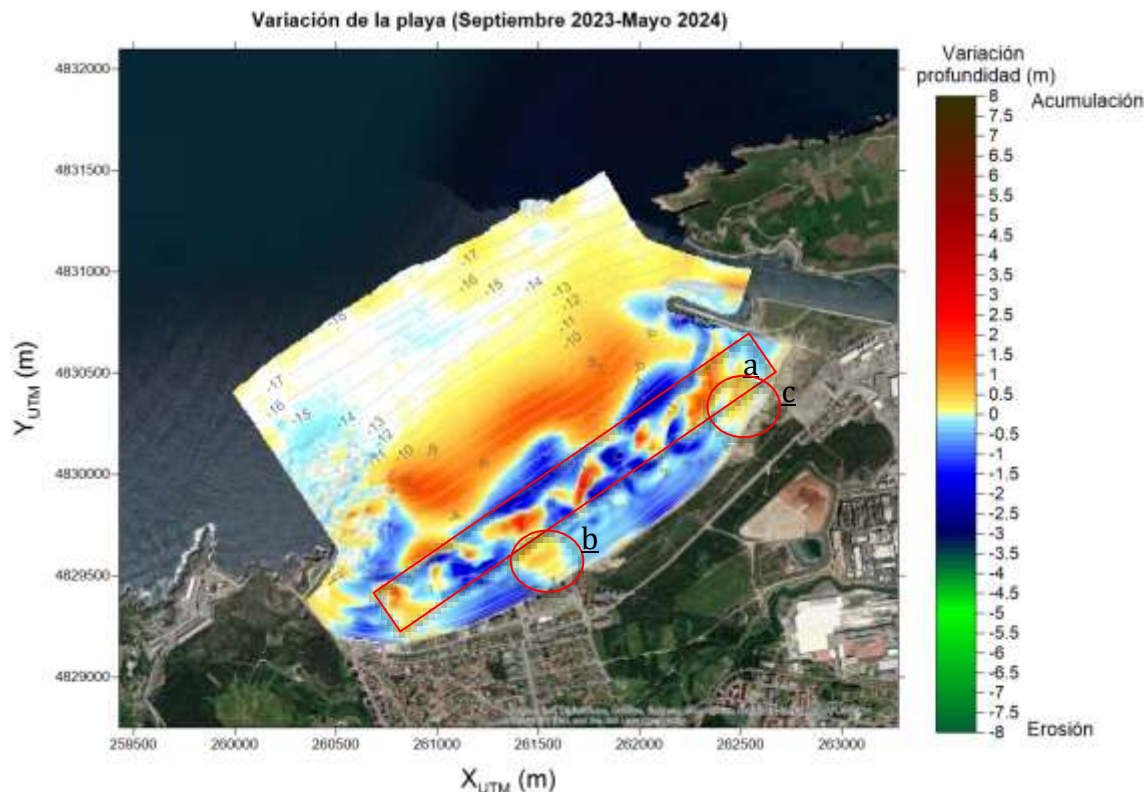


Ilustración 58: Topobatimetría septiembre 2023 y balance sedimentario septiembre 2023-mayo 2024: Variación de cotas en el conjunto de la playa de Salinas entre septiembre 2023 y mayo 2024 (Evolución otoño-invierno). Diferencias de cotas en m.

Por el contrario, en la siguiente imagen se observa cómo la evolución de la playa entre mayo y septiembre de 2024 responde al comportamiento típico de una playa en época de bonanza (primavera-verano), durante la cual los oleajes menos energéticos suben el sedimento hacia cotas más altas, desapareciendo la acumulación entre las cotas -4 y -10 m en la zona central de la playa a la parte alta del perfil y recuperándose la playa seca (acumulaciones entre 0.20 y 1.40 m), como se apreciar en la citada figura.

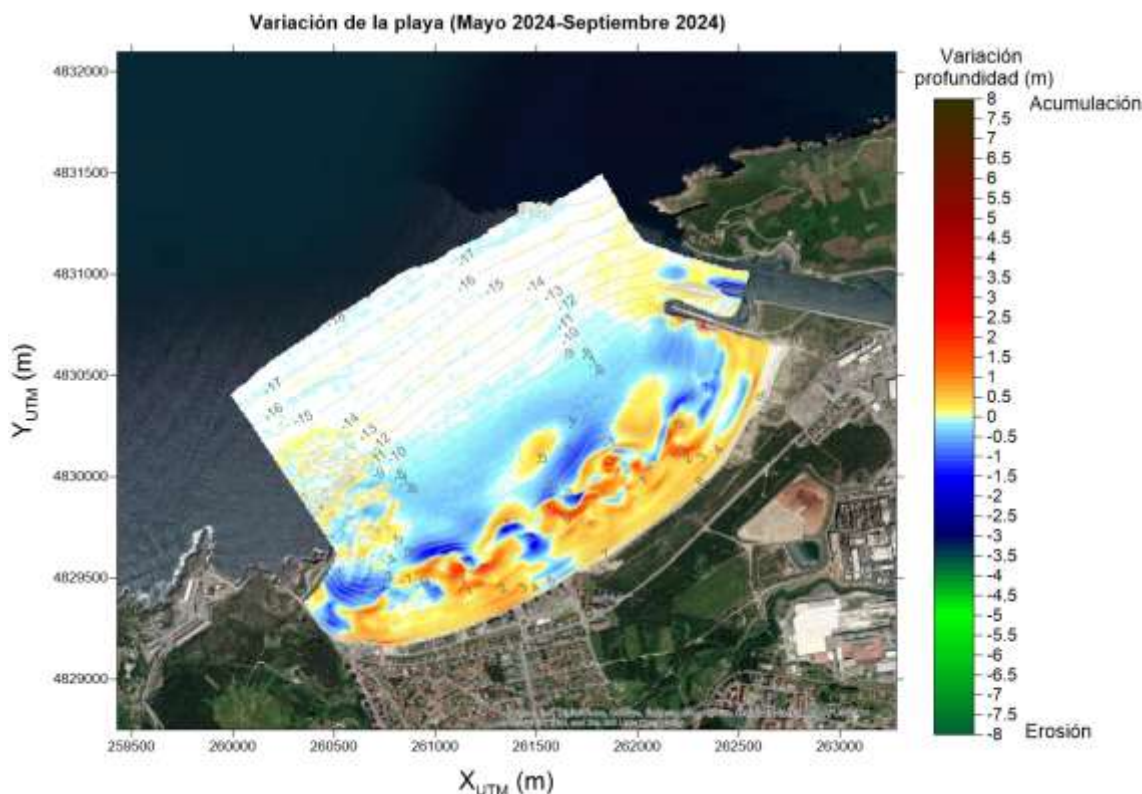


Ilustración 59: Figura 1. Topobatimetría mayo 2024 y balance sedimentario mayo 2024-septiembre 2024: Variación de cotas en el conjunto de la playa de Salinas entre mayo 2024 y septiembre 2024 (Evolución primavera-verano). Diferencias de cotas en m.

En cuanto a la erosión, puede observarse que es algo generalizada en la playa entre las cotas -9 y -2 metros en la amplia zona central y occidental entorno a la cota -0.25m y -0.5 m en casi toda la playa.

En la Tabla 12 se muestra el balance sedimentario experimentado por la playa en el periodo septiembre 2023-septiembre 2024.

Como puede comprobarse, en el periodo septiembre 2023- septiembre 2024, se ha producido una acumulación neta de unos 92.003 m³, con movimientos de arena entre 560.000-655.000 m³ y variaciones medias tanto de acreción como de erosión en el entorno de 0.29-0.39 metros, por lo que se puede decir que se han producido grandes movimientos de arena.

Cabe señalar, que esta acumulación neta que se ha observado en la playa se ha generado de forma natural, dado que, según la información aportada por la APAV, no se ha realizado ninguna aportación a la playa en ese periodo.

En cuanto al periodo invernal, representado por el periodo septiembre 2023-mayo 2024 en la Tabla 12, se observa que en esta época ha habido también una ganancia de arena (86.543 m³) y en el periodo estival (marzo-septiembre 2023) se ha observado una acumulación de sólo unos 5.460 m³.

		PLAYA COMPLETA		
		Volumen (m ³)	Superficie (m ²)	Variación media (m ³ /m ²)
Evolución anual Septiembre 2023-Septiembre 2024	Acreción	655 861	2 249 360	0.292
	Erosión	-563 858	1 439 807	-0.392
	Totales	92 003	3 689 167	0.025
Evolución otoño-invierno Septiembre 2023-Mayo 2024	Acreción	766 758	2 209 296	0.347
	Erosión	-680 215	1 479 872	-0.460
	Totales	86 543	3 689 167	0.023
Evolución primavera-verano Mayo 2024-Septiembre 2024	Acreción	416 251	1 703 896	0.244
	Erosión	-410 791	1 985 271	-0.207
	Totales	5 460	3 689 167	0.001

Tabla 12. Resumen del balance sedimentario en la playa completa en el periodo 2023-2024.

En la Tabla 13 se resumen los balances sedimentarios de la playa completa desde 2005 hasta 2023. Nótese que no se ha incluido la batimetría de 2001 por no abarcar toda la extensión de la playa como el resto. En la tabla, los valores del P01 al P08 representan los valores calculados por el CEDEX (2015) con base en sus campañas topo-batimétricas.

Siguiendo el criterio del CEDEX, se ha omitido la campaña anual de octubre de 2010 debido a que los datos de esa campaña fueron descartados por no resultar fiables, por eso se ha evaluado el periodo 2009-2011.

Se hace notar que el valor correspondiente al P05 se ha tomado el valor del informe correspondiente a la Fase de 2011 (-104.199 m³ en CEDEX, 2012), en lugar del reflejado en el del CEDEX (2015), ya que hay un error tipográfico.

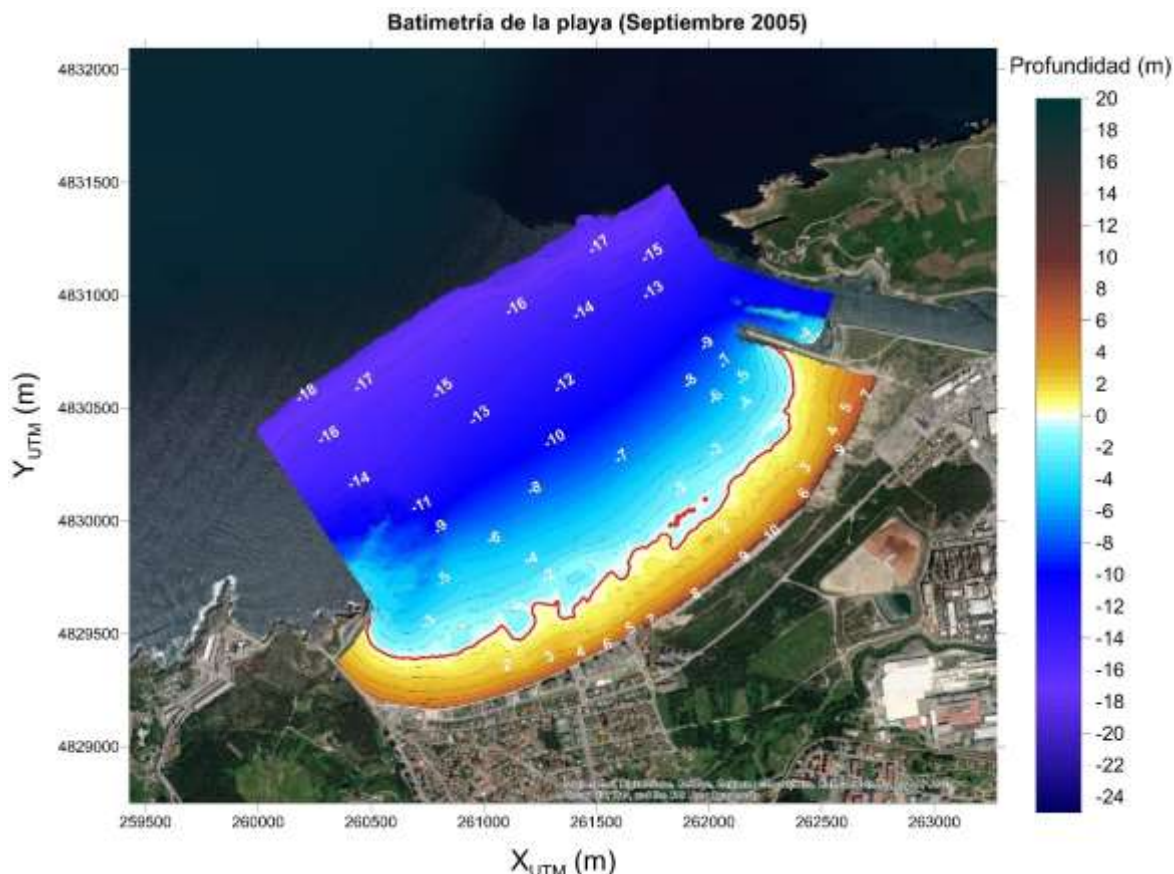


Ilustración 60: Topobatimetría de la playa. Septiembre 2005.

Con el fin de analizar el balance sedimentario global, se han considerado varios periodos de referencia considerando como base la batimetría de septiembre de 2005 (Ilustración 60):

- PT01-Septiembre 2005-agosto 2014: para ver el balance de las campañas anteriores al dragado (seguimiento realizado por el CEDEX).
- PT02- Septiembre 2005-septiembre 2021: para analizar el balance tras el dragado de 2021.
- PT03- Septiembre 2005-agosto 2022: para ver el balance global en el primer año desde el dragado de 2021.
- PT04- Septiembre 2005-septiembre 2023: para ver el balance global en el segundo año desde el dragado de 2021.
- PT05- Septiembre 2005-septiembre 2024: para ver el balance global en el tercer año desde el dragado de 2021.
- PT06- Septiembre 2021-septiembre 2023: para ver el balance global en el segundo año desde el dragado de 2021.
- PT07- Septiembre 2021-septiembre 2024: para ver el balance global en el tercer año desde el dragado de 2021.

- PT08 Septiembre 2023-septiembre 2024: para analizar el balance en el periodo 2023-2024.

En los informes del seguimiento del CEDEX, el balance global se determinaba como la suma de las campañas anteriores, por ejemplo, el balance correspondiente al periodo sep05-ago14 se debería de obtener como la suma de los valores obtenidos para los periodos P01 a P08, pero como se ha visto que pueden encontrarse errores en las estimaciones previas, como el caso P05, se ha decidido estimar los balances sedimentarios como la diferencia de batimetrías inicial y final de cada periodo. De este modo, PT05 se obtiene como la diferencia de las batimetrías de septiembre de 2005 y septiembre de 2024.

Como se aprecia en la Tabla 13, existe una gran variabilidad del volumen de arena en la playa (entre -400.000 y 625.000 m³ aproximadamente), resultando que unos años la playa gana arena y otros la pierde, entre los que cabe destacar los periodos 2008-2009, 2009-2011 y 2013-2014 en los que el balance anual es una gran pérdida de arena debido a alta frecuencia e intensidad de los temporales de oleaje de enero-marzo 2009, noviembre 2010 y 2011 y febrero-marzo 2014 respectivamente; mientras que en el invierno 2023-2024 (P12) se han ganado 86.543 m³.

Según las estimaciones realizadas en el presente estudio, el balance global (PT05) es una acumulación de arena de unos 926 751 m³ respecto a la situación en 2005, y la arena se ha acumulado principalmente en el perfil sumergido entre las cotas -3 y -13 m en la parte central de la playa.

Sin embargo, esta acumulación de arena está condicionada por los cambios experimentados por la playa en los años en los que no se dispone información de la playa completa (P09: ago14-sep21), durante los cuales el balance global es claramente superior a lo observado en el pasado (aproximadamente 625.000 m³).

Dado que no se ha llevado a cabo ninguna regeneración de la playa desde enero de 2005, esa acumulación de arena en el perfil sumergido, es una clara evidencia de que la zona de estudio se trata de un sistema abierto (IHCantabria, 2021), debido a que, la aparición de ese gran volumen de arena en el perfil sumergido, es compatible con transporte del sedimento fino perdido durante los temporales de 2014 en la franja litoral entre el Nalón y Avilés.

En el periodo objeto de este estudio (septiembre 2023-septiembre 2024, PT08), la acumulación obtenida (92.000 m³) sigue siendo inferior a la observada en otras anualidades antes del dragado (aproximadamente un 33% inferior a la mínima observada P06), aunque es un 44% superior al volumen de la anualidad anterior P11 (63.798 m³). Por lo tanto, parece que continua la tendencia de acumulación observada en el informe anterior (IHCantabria, 2024) a pesar del dragado de 2021, que es compatible con la hipótesis de sistema abierto verificada en el estudio de IHCantabria (2021).

Periodo	Volumen (m ³)
P01: sep05-sep06	-57 557
P02: sep06-sep07	-91 899
P03: sep07-oct08	243 252
P04: oct08-oct09	-396 428
P05: oct09-oct11	-104 199
P06: oct11-oct12	137 574
P07: oct12-sep13	251 947
P08: sep13-ago14	-99 220
P09: ago14-sep21	622 543
P10: sep21-ago22	29 085
P11: ago22-sep23	63 798
P12: sep23-may24	86 543
P13: may24-sep24	5460
PT01: sep05-ago14	-107 138
PT02: sep05-sep21	515 405
PT03: sep05-ago22	544 490
PT04: sep05-sep23	608 288
PT05: sep05-sep24	926 751
PT06: sep21-sep23	92 883
PT07: sep21-sep24	184 886
PT08: sep23-sep24	92 003

Tabla 13. Balance sedimentario histórico (playa completa).

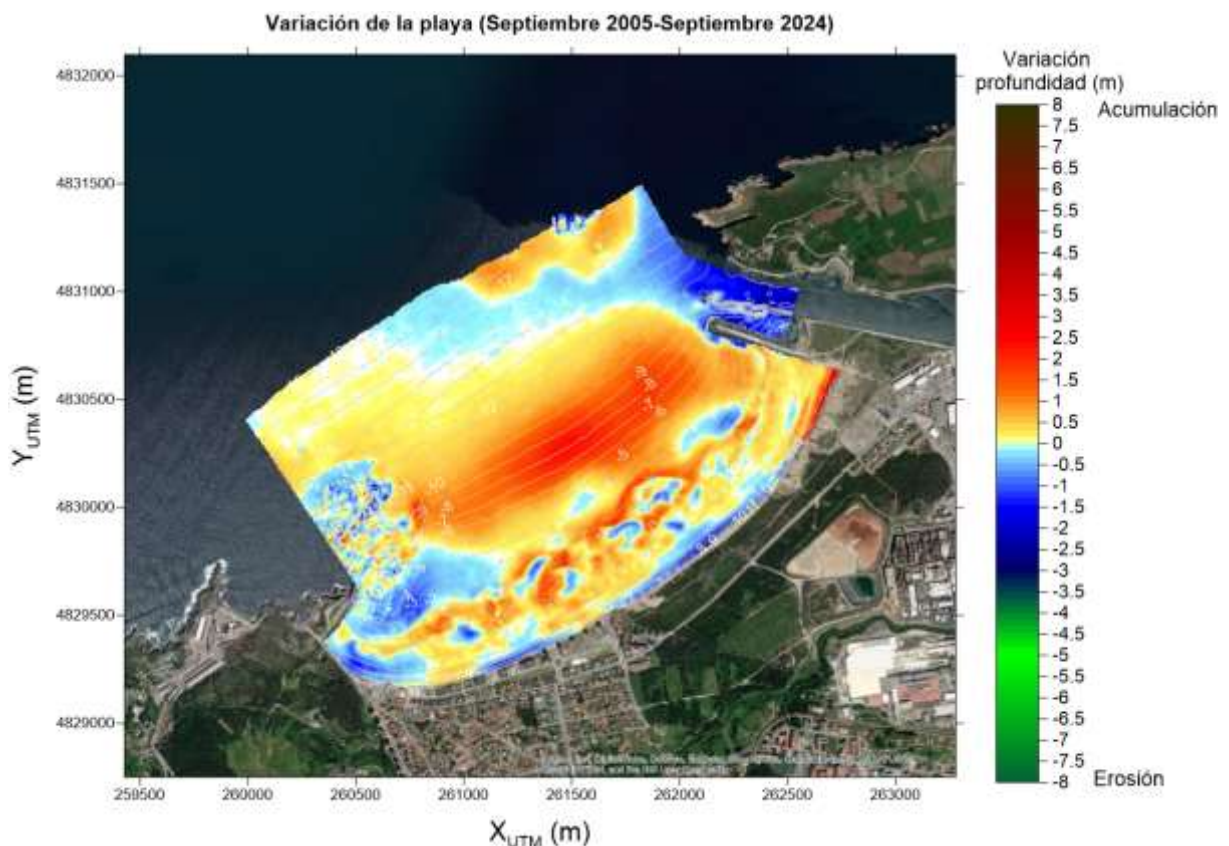


Ilustración 61: Topobatimetría septiembre de 2005 y balance sedimentario 2005-2024: Variación de cotas en el conjunto de la playa de Salinas entre septiembre de 2005 y septiembre de 2024. Diferencias de cotas en m.

Las imágenes a continuación se incluyen a fin de comprar las diferencias entre las batimetrías de los períodos 2021-2022 (primer período), 2022-2023 (segundo período) y 2023-2024 (tercer período). Puede observarse como para el primer y tercer período, el sector oriental de la playa presenta una acumulación de sedimentos y una erosión en la zona contigua al tronco y morro del espigón, mientras que en el segundo período esto es al revés, se presenta una erosión en la playa y una acumulación en la parte sumergida del perfil.

En el periodo 2023-2024 se observa una mayor distribución del sedimento en las partes más bajas del perfil, un patrón similar al primer período, pero contrario al del segundo período, en el cual se tiene erosión en la parte central de la playa. En cambio, la erosión en el período 2023-2024 se encuentra al pie de la misma, y en la parte emergente frente a El Espartal y Salinas.

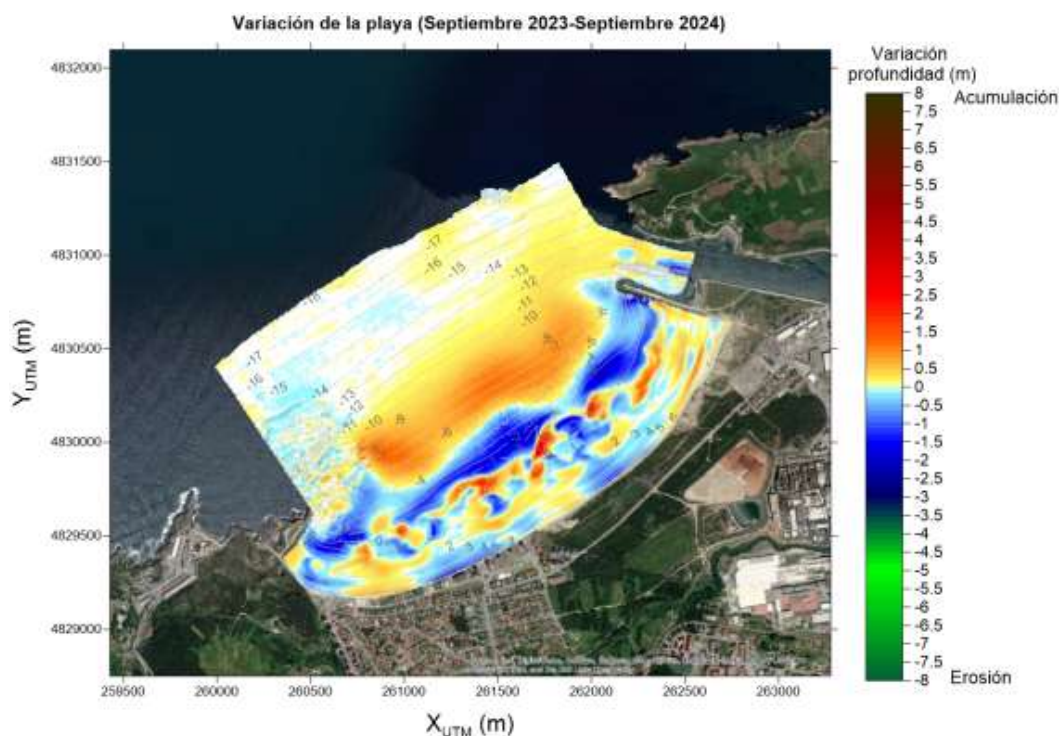


Ilustración 62: Variación de la playa completa. Período 2023-2024. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV

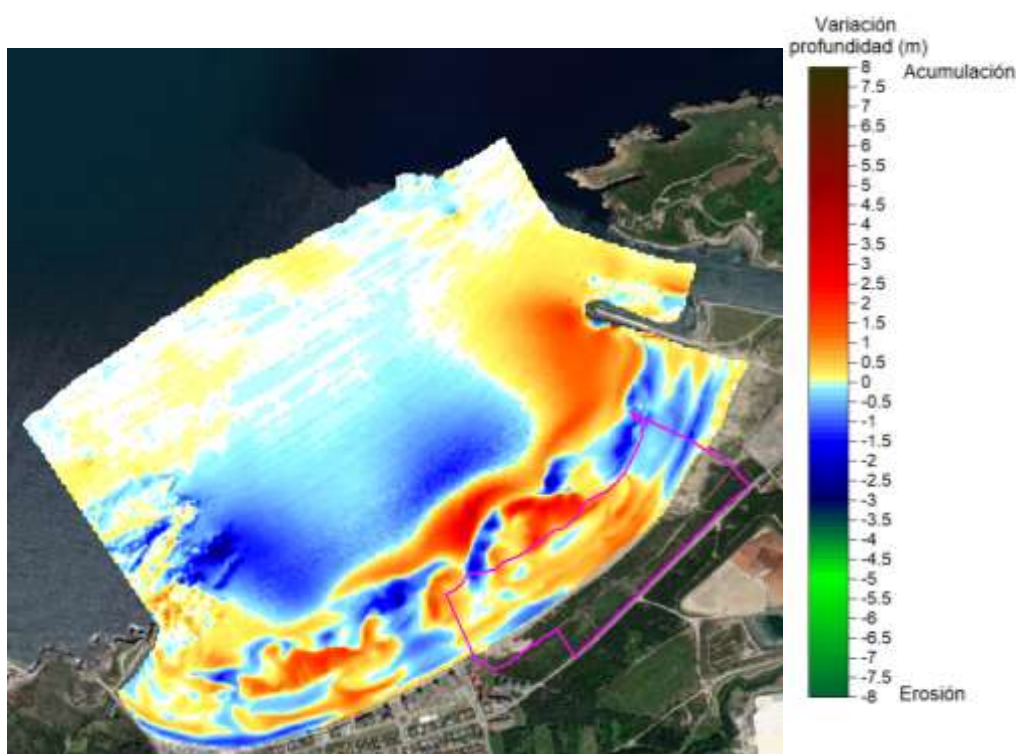


Ilustración 63: Variación de la playa completa. Período 2022-2023. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV

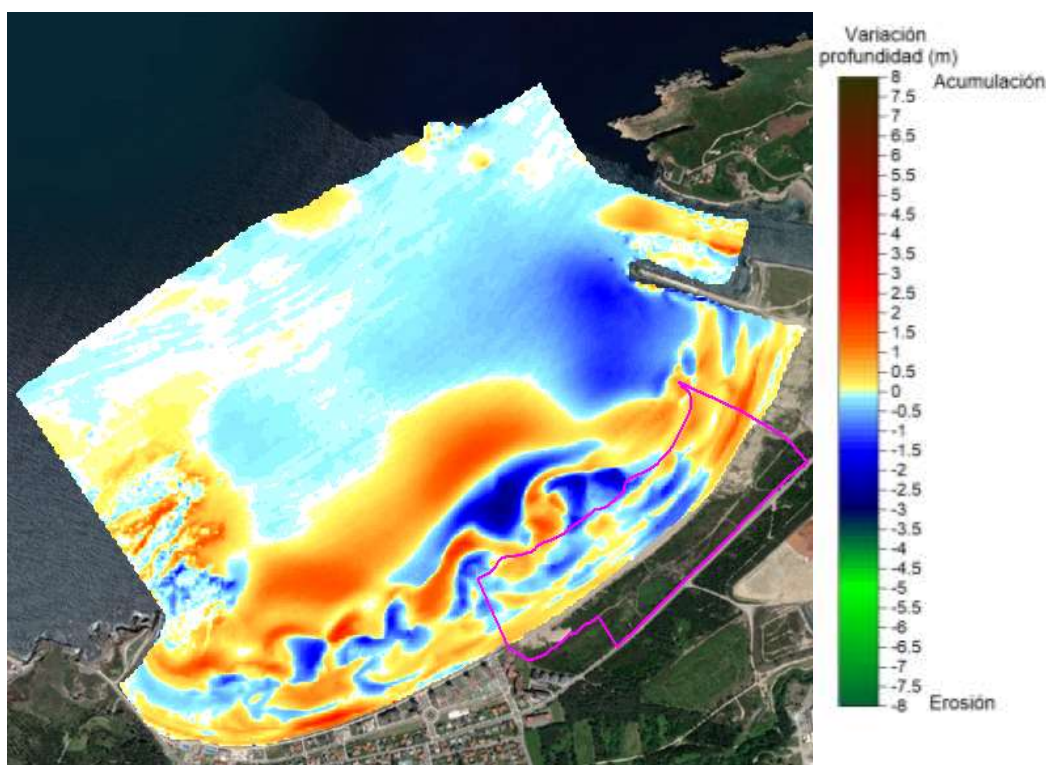


Ilustración 64: Variación de la playa completa. Período 2021-2022. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV.

6.2 Evolución de la playa seca

En este apartado se analiza la evolución de la playa seca en el periodo 2023-2024, entendiendo por playa seca la zona considerada por el CEDEX en sus estudios de seguimiento (véase contorno rojo en la Ilustración 65), aunque en realidad engloba tanto la playa seca como la zona intermareal.

Para analizar dicho periodo se dispone de las campañas de septiembre de 2023, mayo de 2024 y septiembre de 2024, lo que ha permitido evaluar la evolución de la playa seca en tres periodos (véase Tabla 14):

- Septiembre 2023-septiembre 2024, periodo que representa la evolución anual.
- Septiembre 2023-mayo 2024, periodo que representa la evolución otoño-invierno.
- Mayo 2024-septiembre 2024, periodo que representa la evolución primavera-verano.

		PLAYA SECA		
		Volumen (m ³)	Superficie (m ²)	Variación media (m ³ /m ²)
Evolución anual Septiembre 2023-Septiembre 2024	Acreción	75 847	306 063	0.248
	Erosión	-88 255	274 579	-0.321
	Totales	-12 408	580 643	-0.021
Evolución otoño-invierno Septiembre 2023-Mayo 2024	Acreción	46 744	165 638	0.282
	Erosión	-225 523	415 004	-0.543
	Totales	-178 779	580 643	-0.308
Evolución primavera-verano Mayo 2024-Septiembre 2024	Acreción	201 227	475 636	0.423
	Erosión	-34 857	105 007	-0.332
	Totales	166 370	580 643	0.287

Tabla 14. Resumen del balance sedimentario en la playa seca en el periodo 2023-2024.

En la Ilustración 65, la Ilustración 66, la Ilustración 67 y la Ilustración 68 se muestra el balance sedimentario en el periodo de estudio completo (septiembre 2023-septiembre 2024), en la época otoño-invierno, primavera-verano y en el periodo 2005-2024 respectivamente. Tal y como se ha comentado anteriormente, en estos balances se representa en tonos cálidos (rojo-amarillo) la acumulación de arena y en tonos fríos la erosión (azul-verde). También se ha identificado en magenta la zona considerada Monumento Natural.

En la evolución anual en el periodo objeto de estudio (Ilustración 65), se observa acumulación de arena en las cotas altas del perfil y dunas, que es más marcado en el sector oriental, con acumulaciones de hasta 1 m. El balance neto en este periodo es una pérdida de arena unos 12.400 m³ respecto a la situación en agosto de septiembre 2023, tal y como se observa en la Tabla 15 (PST04).

Si se compara la campaña de 2024 con la del 2005 (PST03 en Tabla 15) se observa que la playa ha perdido unos -8.650 m^3 de la zona de playa seca e intermareal. Sin embargo, en ese periodo no se ha observado una pérdida de arena en la playa completa sino una ganancia de unos 926.751 m^3 respecto a 2005 (PT05 en Tabla 13). Esto se debe a la gran cantidad de arena que se ha acumulado en el perfil sumergido (Ilustración 61).

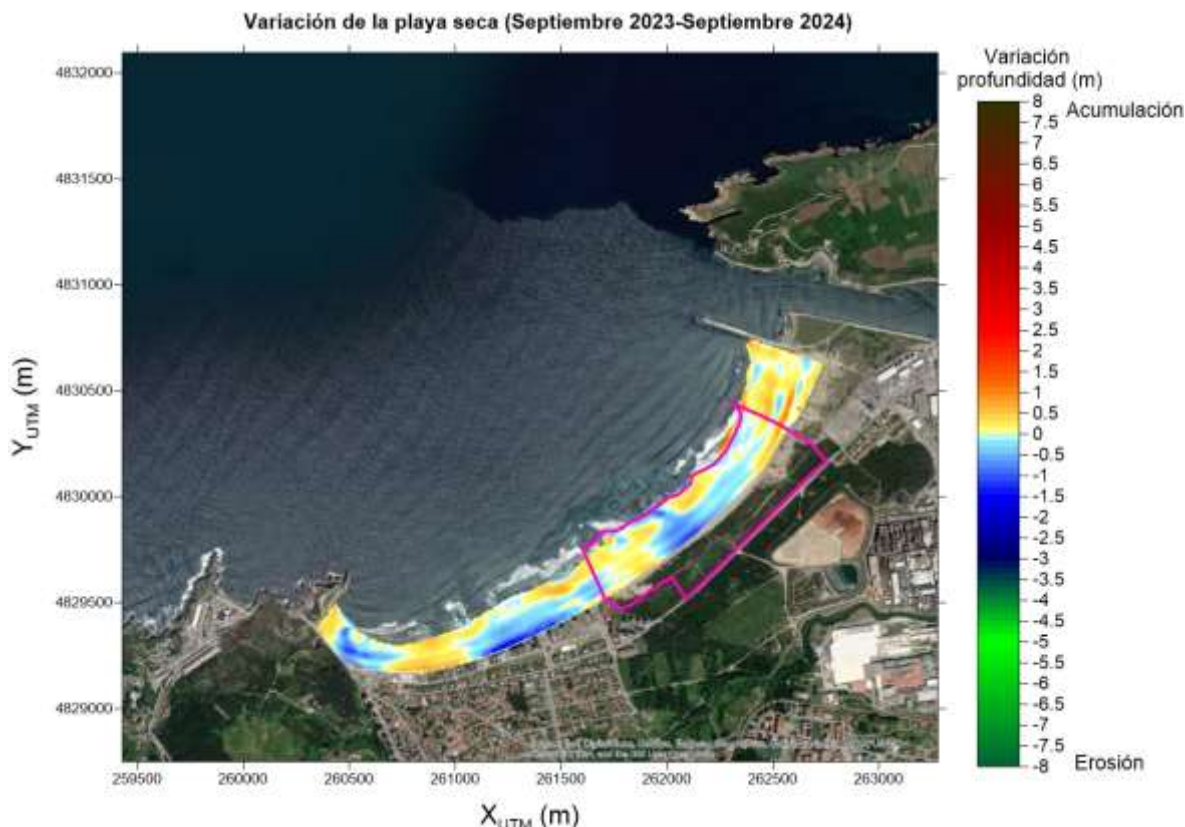


Ilustración 65: Balance sedimentario septiembre 2023-septiembre 2024: Variación de cotas en la playa seca de Salinas entre septiembre de 2023 y agosto de 2024 (Evolución anual). Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV.

Al observar los balances de todo el periodo de seguimiento (Tabla 15), se observa que la playa seca presenta una gran variabilidad de un año a otro (entre -245.000 m^3 y 180.000 m^3), pero sí se identifican patrones como, por ejemplo:

- Las grandes pérdidas de la playa seca PS07 y PS16 asociadas a los temporales de oleaje de enero-marzo 2009 y febrero-marzo 2014 respectivamente.
- La tendencia a aumentar la playa seca en los últimos años dado que no se han registrado temporales tan energéticos como los de 2009 y 2014. Aunque aún haya un déficit de unos 8.650 m^3 respecto a la situación en septiembre de 2005, la playa seca se ha recuperado en un 83% respecto al balance global de 2022 (PST01, unos 50.000 m^3). Como se aprecia en la Ilustración 65, la mayor recuperación se ha producido en el periodo primavera-verano, en la zona del Monumento Nacional y en el sector occidental, donde se han producido acumulaciones de hasta 1-1.2 m.

Periodo	Volumen (m ³)
PS01: may05-sep05	178 505
PS02: sep05-may06	-179 990
PS03: may06-sep06	110 982
PS04: sep06-sep07	-93 149
PS05: sep07-may08	-148 644
PS06: may08-oct08	153 218
PS07: oct08-may09	-243 339
PS08: may09-oct09	105 586
PS09: oct09-may10	9 379
PS10: may10-may11	67 332
PS11: may11-oct11	47 411
PS12: oct11-may12	-114 214
PS13: may12-oct12	128 426
PS14: oct12-may13	-116 976
PS15: may13-sep13	91 808
PS16: sep13-may14	-241 186
PS17: may14-ago14	67 278
PS18: ago14-may16	50 359
PS19: may16-sep19	35 231
PS20: sep19-sep21	105 652
PS21: sep21-ago22	80 062
PS22: ago22-sep23	43 098
PS23: sep23-may24	-178 778
PS23: may24-sep24	166 370
PST01: sep05-ago22	-49 998
PST02: sep05-sep23	-6 243
PST03: sep05-sep24	-8649
PST04: sep23-sep24	-12408

Tabla 15. Balance sedimentario histórico (playa seca).

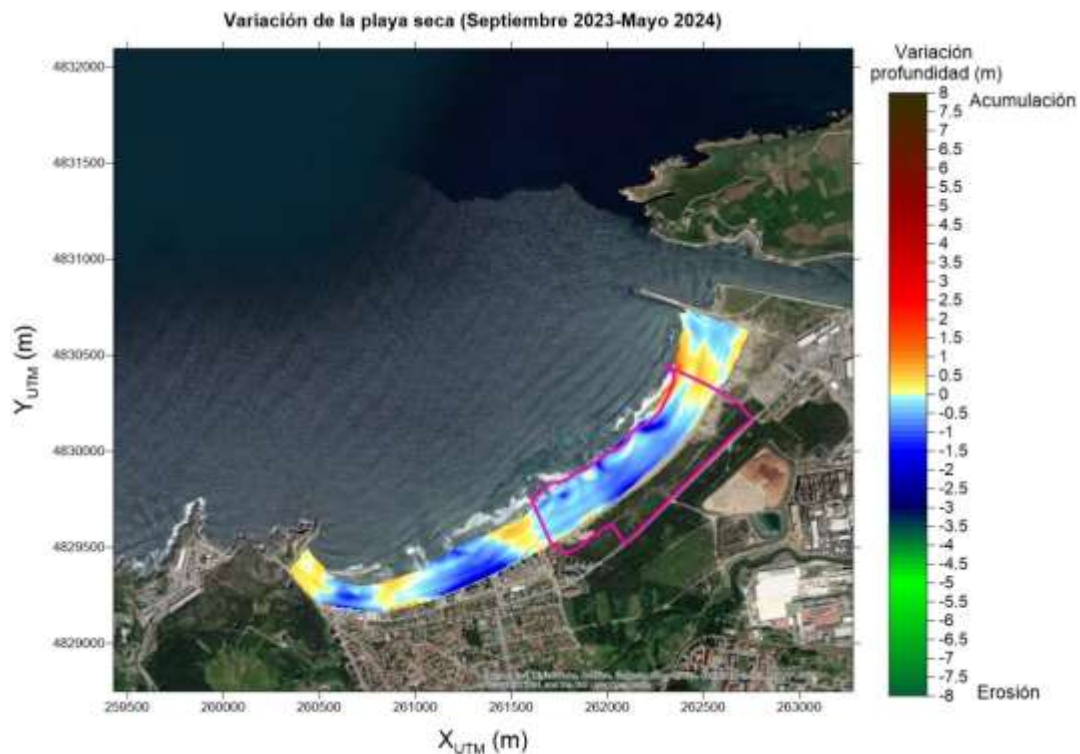


Ilustración 66: Balance sedimentario septiembre 2023-mayo 2024: Variación de cotas en la playa seca de Salinas entre septiembre de 2023 y mayo de 2024 (Evolución otoño-invierno). Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv

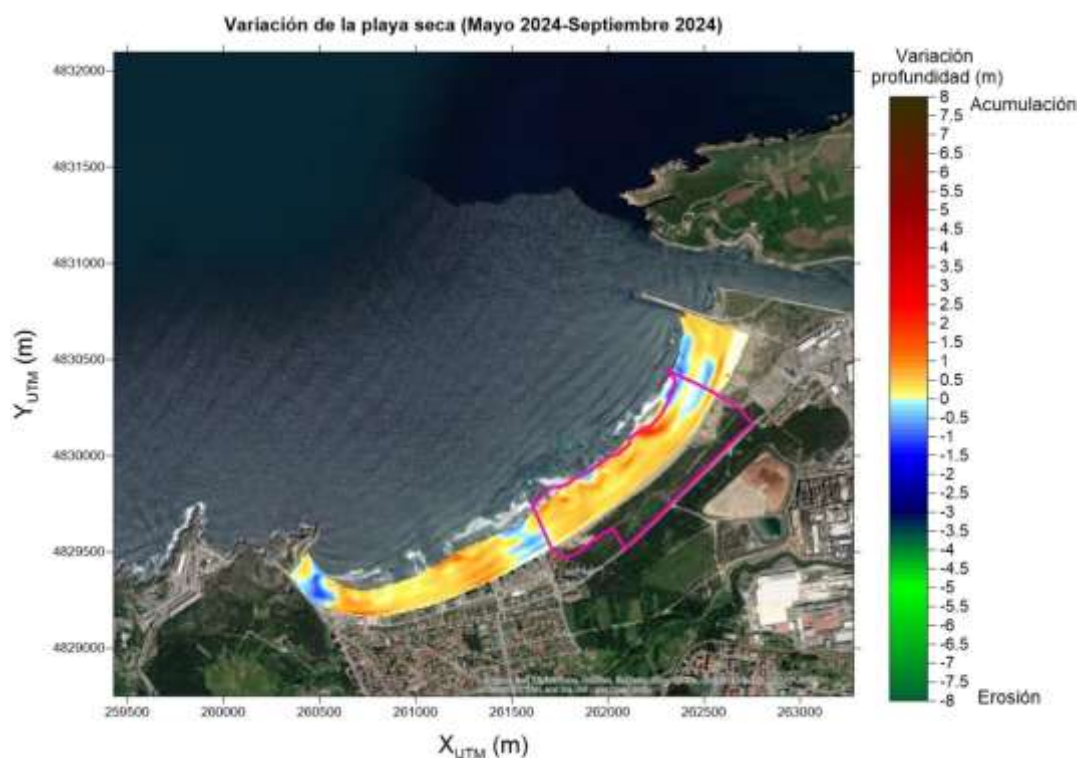


Ilustración 67: Balance sedimentario mayo 2024-septiembre 2024: Variación de cotas en la playa seca de Salinas entre mayo de 2024 y septiembre de 2024 (Evolución primavera-verano). Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv

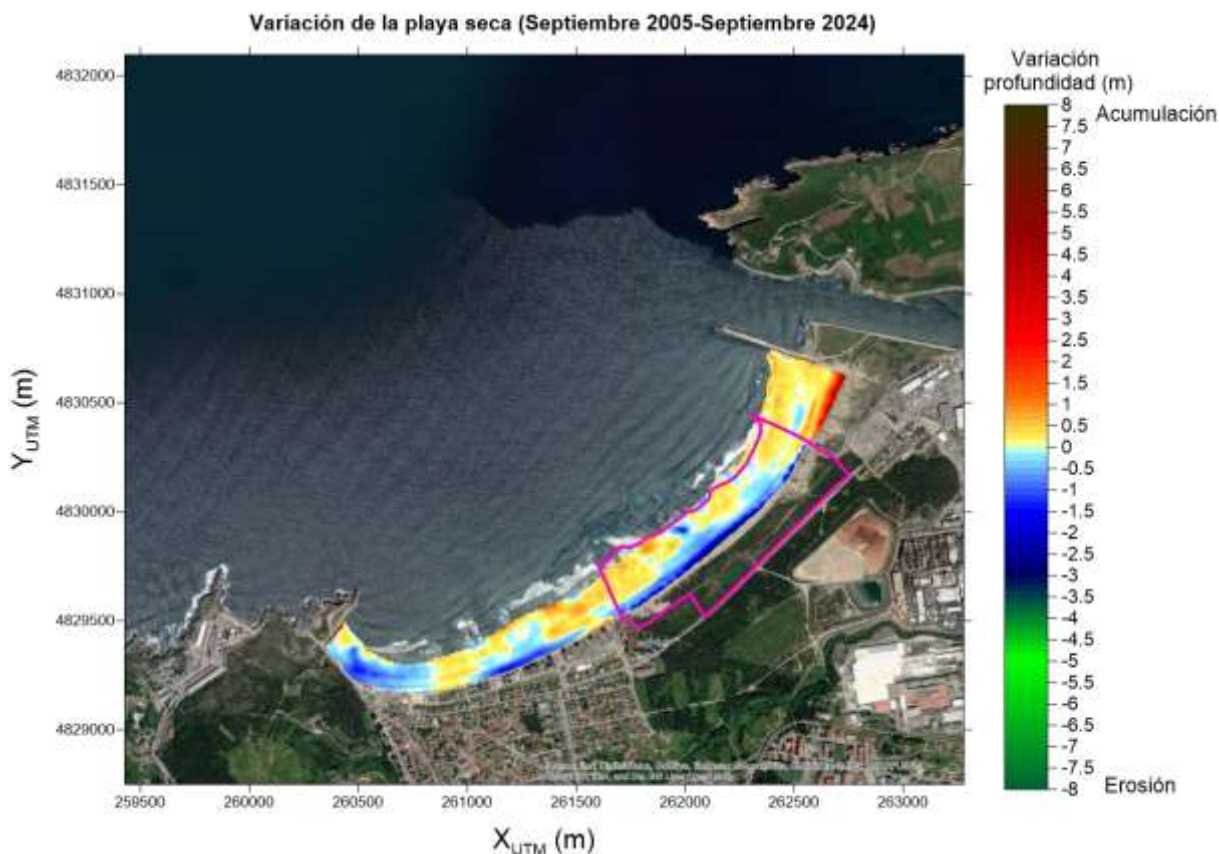


Ilustración 68: Balance sedimentario 2005-2024: Variación de cotas en la playa seca de Salinas entre septiembre de 2005 y septiembre de 2024. Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV

6.3 Evolución de la zona del canal

A continuación, se analiza la variación de los fondos en la zona del canal de entrada al Puerto de Avilés en el periodo 2023-2024. Para ello, se han empleado las campañas topobatimétricas de septiembre de 2023, mayo de 2024 y septiembre de 2024.

En la Ilustración 69, la Ilustración 70 y la Ilustración 71 se ha representado la batimetría correspondiente a septiembre de 2023, mayo de 2024 y septiembre de 2024, limitadas a la extensión en la que había información de dichas campañas, y en la Tabla 16 se resume el balance sedimentario de la canal en el periodo 2023-2024. Como se aprecia en las citadas figuras, entre septiembre de 2023 y septiembre de 2024, se aprecian visualmente diferencias en las topobatimetrías, dado que la APAV ha efectuado un dragado entre fines de mayo y principios de junio. Particularmente, se observa el área rectangular dragada junto al dique. En este periodo se han perdido unos 6.000 m³ de arena (véase Tabla 16) en el área común de ambas topobatimetrías.

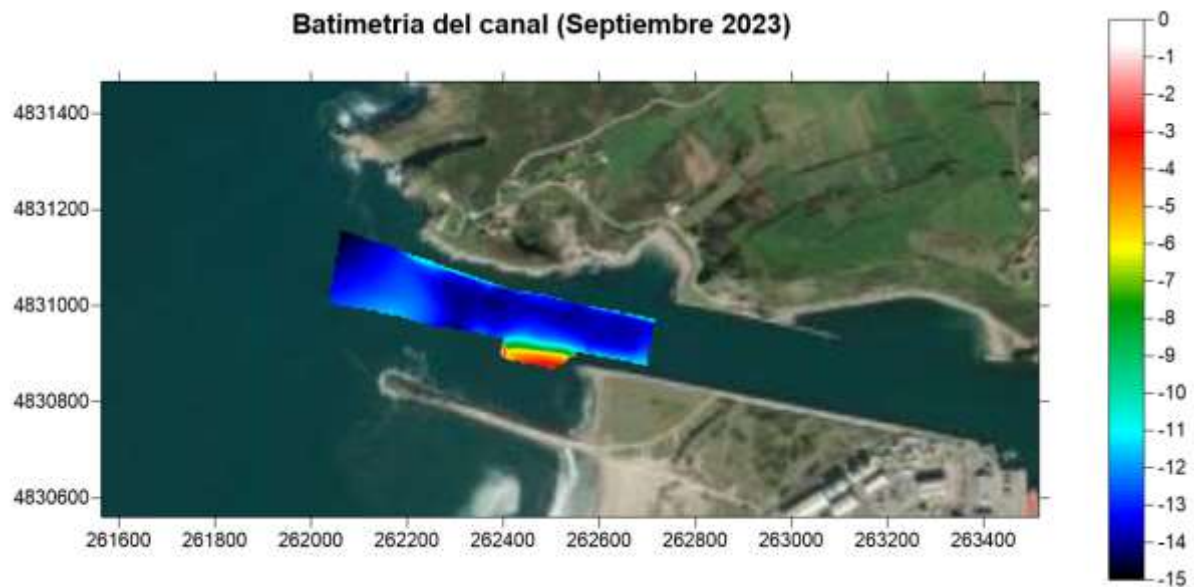


Ilustración 69. Batimetría del canal de entrada (Septiembre 2023). Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV

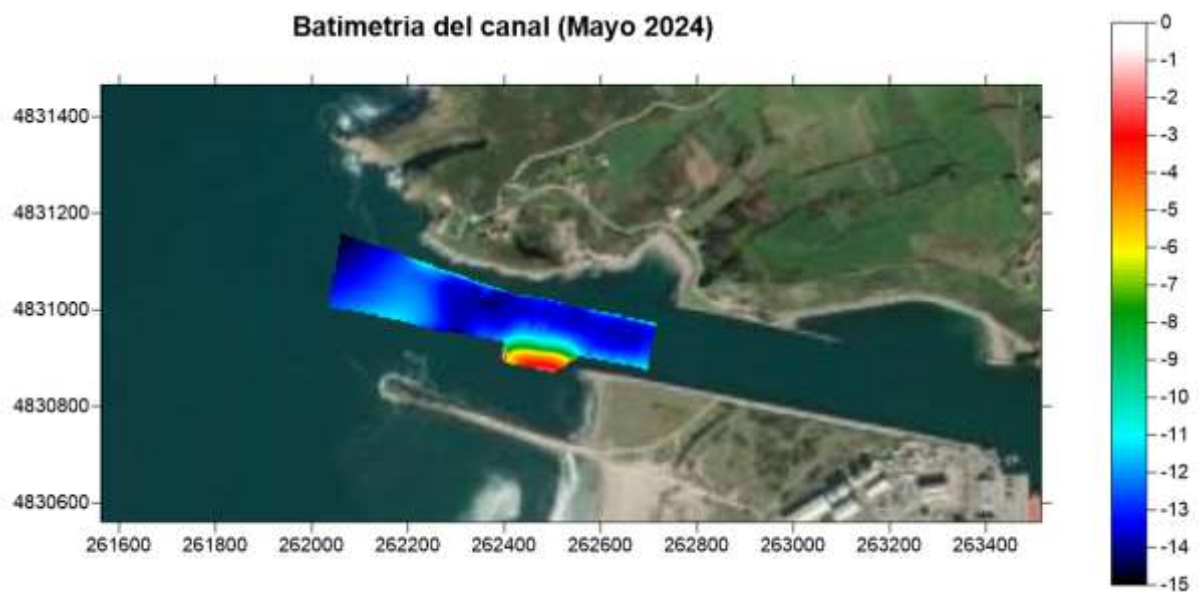


Ilustración 70: Batimetría del canal de entrada (Mayo 2024). Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV



Ilustración 71: Batimetría del canal de entrada (Junio 2024. Post-dragado). Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv



Ilustración 72: Batimetría del canal de entrada (Septiembre 2024). Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv

Asimismo, en la Tabla 16 también se resume el balance sedimentario de la operación de dragado. Debido a la actuación, se ha producido una pérdida de arena neta de unos 33.865 m³, valor totalmente compatible con el volumen cuantificado en la extracción (aproximadamente unos 30.000 m³).

		CANAL		
		Volumen (m ³)	Superficie (m ²)	Variación media (m ³ /m ²)
Evolución anual Septiembre 2023 - Septiembre 2024	Acreción	11 966	57 541	0.208
	Erosión	-17 924	26 146	-0.686
	Totales	-5 958	83 688	-0.071
Evolución otoño-invierno Septiembre 2023-Mayo 2024	Acreción	19 206	77 742	0.247
	Erosión	-473	5 946	-0.080
	Totales	18 733	83 688	0.224
Evolución mayo 2024 – Junio 2024	Acreción	1 324	14 559	0.091
	Erosión	35 189	69 128	0.509
	Totales	-33 865	83 687	-0.405
Evolución primavera-verano Junio 2024-Septiembre 2024	Acreción	9 648	78 963	0.122
	Erosión	-474	4 725	-0.100
	Totales	9 174	83 688	0.110

Tabla 16. Resumen del balance sedimentario en el canal de acceso al Puerto en el periodo 2023-2024 (septiembre 2023-septiembre 2024)).



Ilustración 73: Balance sedimentario septiembre 2023 - mayo 2024: Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto entre septiembre 2023 y mayo 2024. Diferencias de cotas en m.

Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV



*Ilustración 74: Balance sedimentario mayo 2024 - campaña 30 de mayo 2024 (predragado): Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto en mayo 2024. Diferencias de cotas en m.
Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV*



Ilustración 75: Balance sedimentario mayo-junio 2024: Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto entre mayo y junio de 2024 (pre y post dragado). Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV



Ilustración 76: Balance sedimentario junio 2024 - septiembre 2024: Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto entre junio 2024 y septiembre 2024. Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV



Ilustración 77: Balance sedimentario septiembre 2023 - septiembre 2024: Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto entre septiembre 2023 y septiembre 2024. Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAV

Con el fin de continuar con el seguimiento realizado por el CEDEX, en la Tabla 17 se muestra el balance sedimentario histórico del canal de entrada al Puerto en el área de control definida por el CEDEX. No obstante, los resultados que se obtienen en esta zona hay que interpretarlos con cautela, porque la zona de dragado habitual no coincide en extensión (ni en longitud ni anchura) con dicha área de control. Del mismo modo que en la playa seca, en esta zona de control también se aprecian pérdidas de arena durante los temporales de noviembre 2011 y febrero-marzo 2014

(PC6 y PC8 respectivamente) y también una gran pérdida de arena que supera los 200.000 m³ respecto a 2005 en los periodos globales (PCT1, PCT2, PCT3 y PCT4). Desde agosto de 2014, los balances globales de los últimos años en esta área de control han sido siempre positivos, lo que ha permitido que la zona vaya recuperándose lentamente, no obstante, en el último período de análisis (PCT05) se observa un aumento del volumen de pérdidas respecto a la anualidad anterior, pasando de 200.000 m³ a 203.500 m³.



Ilustración 78: Zona de dragado 2021.

Periodo	Volumen (m ³)
PC01: sep05-sep06	-45 717
PC02: sep06-sep07	-46 970
PC03: sep07-oct08	-82 471
PC04: oct08-oct09	31 971
PC05: oct09-oct11	2 050
PC06: oct11-oct12	-27 923
PC07: oct12-sep13	24 973
PC08: sep13-ago14	-34 616
PC09: ago14-sep21	24 716
PC10: sep21-ago22	8 171
PC11: ago22-mar23	16 204
PC12: mar23-sep23	13 713
PC13: sep23 - sep24	-3 915
PCT01: sep05-ago14	-262 371
PCT02: sep05-sep21	-237 655
PCT03: sep05-ago22	-229 483
PCT04: sep05-sep23	-199 567
PCT05: sep05-sep24	-203 482

Tabla 17. Balance histórico del canal de acceso al Puerto en el área de control propuesta por el CEDEX.

A modo de ejemplo, en la Ilustración 79 se muestra el balance sedimentario en el área de control en el periodo 2005-2024, donde se observa la pérdida generalizada de arena en el área de control definida por el CEDEX, con diferencias de profundidad entre 1-2 m principalmente, aunque hay zonas que alcanzan hasta 4 m y la recuperación parcial de arena en zonas localizadas en la zanja de dragado habitual y en torno al espigón entre 0.5 y 1.5 m.



Ilustración 79: Balance sedimentario 2005-2024 en el área de control: Variación de cotas en el canal de entrada al Puerto entre septiembre de 2005 y septiembre de 2024. Diferencias de cotas en m. Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento aportado por la APAv

6.4 Conclusiones respecto al balance sedimentario

El balance sedimentario de la playa de Salinas durante el periodo 2023-2024 revela una dinámica morfológica compleja caracterizada por importantes movimientos de arena y una acumulación neta significativa.

Principales hallazgos:

- Se registró una ganancia total de 92.003 m^3 de sedimento en el periodo septiembre 2023-septiembre 2024, evidenciando movimientos masivos de arena entre 560.000 - 655.000 m^3 .
- El periodo otoño-invierno (septiembre 2023-mayo 2024) mostró una ganancia de 86.543 m^3 , comportamiento atípico que contrasta con las pérdidas habituales en temporales invernales. El periodo primavera-verano registró una acumulación menor de 5.460 m^3 , indicando un comportamiento típico de recuperación de playa.
- La acumulación neta observada, sin regeneraciones artificiales desde 2005, abona la teoría de que la playa funciona como un sistema abierto con aportes sedimentarios externos, posiblemente provenientes del transporte litoral entre el Nalón y Avilés.

- Respecto a 2005, la playa ha acumulado 926.751 m³, principalmente en el perfil sumergido entre las cotas -3 y -13 metros, siendo el 83% de esta acumulación atribuible al periodo 2014-2021.

7. EVOLUCIÓN DEL FRENTE DUNAR

7.1 Evolución del frente dunar con base en imágenes históricas

Para analizar la evolución del frente dunar a lo largo del tiempo, se ha tomado como punto de partida la información utilizada en el estudio realizado por INDUROT (2017). A esta información base se han incorporado las imágenes más recientes del PNOA correspondientes a los años 2017 y 2020, así como las ortofotografías georreferenciadas de los años 2021, 2022, 2023 y 2024, encargadas por la APAV para llevar a cabo el seguimiento de la playa para dar respuesta a la DIA.

Con base en esta información, se han digitalizado en Autocad las líneas correspondientes al frente dunar de todos los años.

Para analizar la evolución, se ha aplicado la herramienta SeaTool, una toolbox desarrollada por IHCantabria para ArcGIS Pro que permite el análisis de la evolución de líneas de costa (Gallego, Pellón, & Gomes da Silva, 2024). La herramienta está compuesta por varios módulos que permiten generar de forma automática, desde la creación de los transectos en los que se basa el análisis, hasta el graficado de los resultados, pasando por el propio análisis basado en regresiones lineales.

En este caso, la herramienta se ha empleado para analizar la evolución del frente dunar mediante la siguiente secuencia de trabajo:

- A) Digitalización del frente dunar empleando autocad. Los frentes de duna corresponden a los años 1957, 1963, 1969, 1989, 1994, 2001, 2003, 2006, 2009, 2011, 2014, 2016, 2017, 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024 y se han trazado siguiendo el criterio de presencia de vegetación como en el estudio de INDUROT (2017).
- B) Importación de los frentes de playa en ArcGis Pro.
- C) Definición de una línea de base para referencia de medición de distancias.
- D) Definición de transectos distanciados 75 m, en total 22 transectos.
- E) Determinación de la intersección de los transectos con las líneas que representan el frente dunar en cada año analizado, realizando un filtrado manual de los puntos de intersección duplicados para una misma línea de frente dunar.



Ilustración 80: aplicación de SeaTool para el análisis de las líneas de costa. Fuente: Elaboración propia

F) Análisis de los resultados.

De esta manera, el análisis de la evolución temporal del frente dunar se realizó mediante 22 transectos perpendiculares distribuidos a lo largo del área de estudio, los cuales se observan en la imagen a continuación.



Ilustración 81: Ubicación de transectos para medición de frente dunar. Fuente: Elaboración propia.

Para cada transecto se calcularon las siguientes métricas estadísticas: tasa de Regresión Lineal (LRR), intervalos de confianza al 95% (LCI_low y LCI_upp), coeficiente de determinación (R^2), valor de significancia estadística (p-value), error cuadrático medio (RMSE), envolvente de cambio del frente dunar(SCE) y movimiento neto del frente dunar(NSM).

La siguiente imagen muestra la tasa de cambio del frente dunar, en m/año, LRR (Linear Regression Rate). Los valores negativos (color rojo) indican retrocesos del frente dunar, mientras que los valores positivos (en azul) indican avance del mismo. En esta figura se observa que el tramo comprendido entre los perfiles 2 al 15 es el que presenta mayor tasa de retroceso, puntualmente los perfiles 2, 3, 14 y 15 son los más erosionados, con tasas de retroceso entre 1.42 m/año y 1.94 m/año. El sector oriental de la playa presenta un menor retroceso, explicado por la rotación de la playa producto de la construcción del espigón. En este sector, los perfiles 17, 21 y 22 son transectos sin cambios estadísticamente significativos, es decir, no hay una tendencia clara, o los cambios observados están dentro del margen de error o variabilidad natural del sistema, aun cuando el transecto 22 presente una tasa positiva de cambio (0.10 m/año).

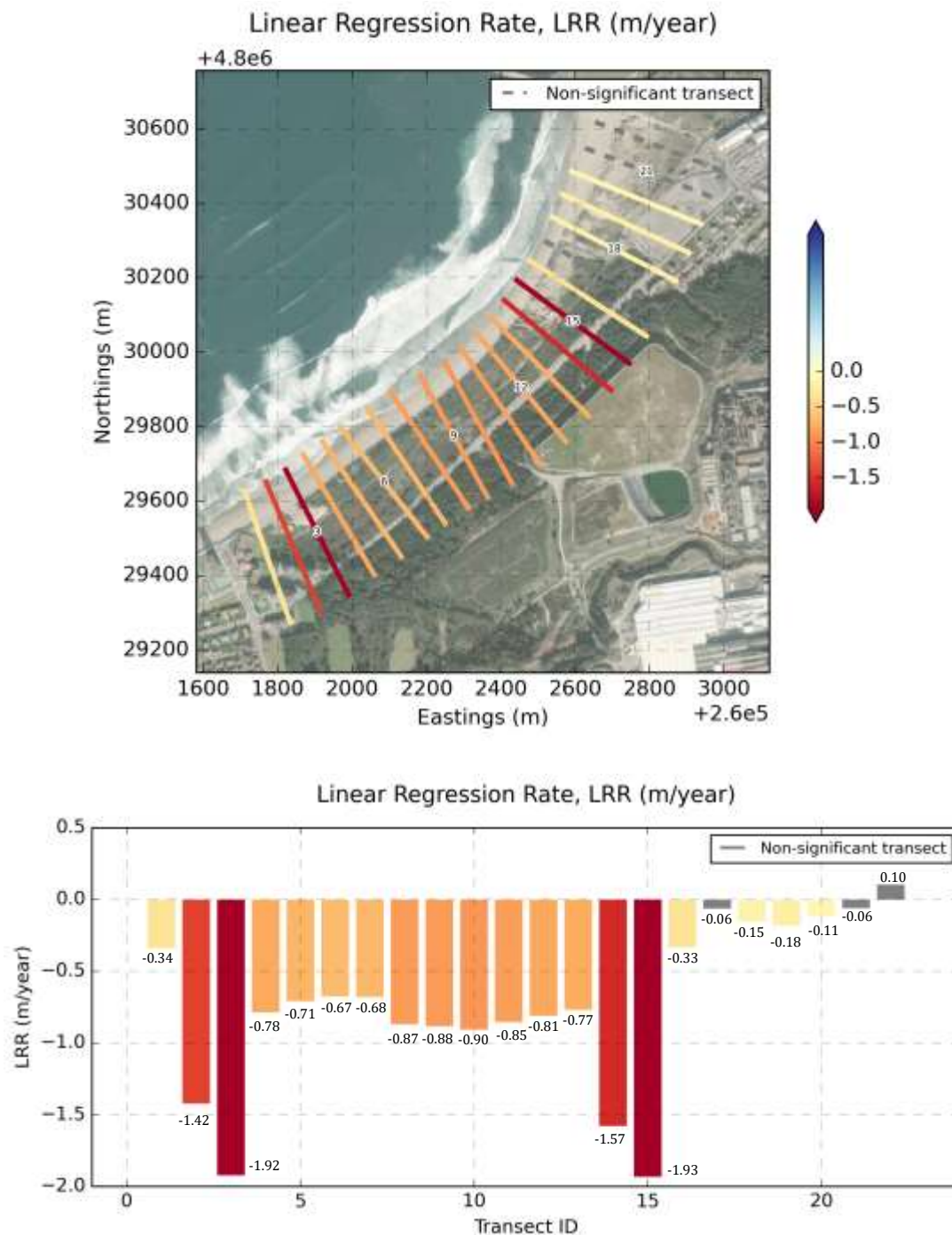


Ilustración 82: Tasa de regresión lineal (LRR) en m/año.

Además, se presentan los intervalos de confianza del 95% del valor de LRR y se expresa como tasas en metros por año. De este modo, si ambos valores son negativos, el retroceso es estadísticamente significativo. Si el intervalo incluye 0 no se puede afirmar con confianza que haya un cambio.

Por otro lado, se indica el coeficiente de determinación R^2 , el cual mide qué tan bien se ajusta la regresión a los datos (1 es perfecto), valores altos (>0.7) indican una tendencia clara.

El P-value mide la significancia estadística de la regresión lineal, es decir prueba si la pendiente es estadísticamente distinta de cero. Cuanto más cercano a cero, más confianza estadística, es decir, indica que es muy improbable que la tendencia observada sea debido al azar.

El error cuadrático medio (RMSE) indica el error promedio de la estimación de posición de la línea. Valores más bajos indican mayor precisión en el ajuste. Los puntos de los datos están más cerca de la línea de tendencia.

El SCE (Shoreline Change Envelope ó envoltente de cambio de línea de costa, en este caso del frente dunar) mide la distancia total entre las posiciones más extremas de los frentes dunares en metros, por lo que indica el rango total de cambio observado. Cuanto mayor el SCE, más dinámico el transecto, mientras que un valor bajo de SCE indica un sistema más estable.

Finalmente, el NSM (Net Shoreline Movement o movimiento neto del frente dunar en este caso) mide la distancia neta entre la posición del frente dunar al inicio y al final del período de análisis en un transecto específico en metros. Es decir, indica el movimiento neto desde la primera a la última fecha (valores negativos: erosión neta, positivos: acreción neta).

A continuación, se resumen algunos de los resultados del análisis del frente dunar en el periodo 1957-2024:

- El análisis revela un patrón espacial diferenciado a lo largo del área de estudio. Los primeros 16 transectos muestran tendencias erosivas con tasas de retroceso que varían entre -0.33 y -1.93 m/año. En contraste, los transectos finales (17-22) presentan un comportamiento estable, con tasas muy reducidas e incluso una tendencia progradacional en el transecto 22.
- Los transectos 3, 14 y 15 son puntos críticos, con tasas de erosión superiores a -1.5 m/año y retrocesos netos acumulados que superan los 83 metros. Estos sectores presentan además los valores más elevados de Envoltente de Cambio (SCE > 115 m), indicando una alta variabilidad morfológica histórica.
- Los transectos 17-21 configuran una zona de transición caracterizada por tasas de cambio muy reducidas (-0.18 a -0.06 m/año) y menor significancia estadística. Esta zona presenta valores de SCE inferiores a 25 metros, sugiriendo un comportamiento más estable. No obstante, algunos de estos transectos muestran p-values superiores a 0.05, indicando que las tendencias detectadas no superan el umbral de significancia estadística establecido.
- Únicamente el transecto 22 presenta una tendencia progradacional (+0.103 m/año) con un avance neto de 14 metros. Sin embargo, el p-value asociado (0.089) sitúa esta tendencia en el límite de la significancia estadística, requiriendo un período de monitoreo más extenso para confirmar su persistencia temporal.

ESTUDIO DE EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DE PLAYAS EN AVILÉS

Nº transecto	LRR	LCI_low	LCI_upp	R2	Pvalue	RMSE	SCE	NSM
	(m/año)	(m/año)	(m/año)			(m/año)	m	m
1	-0.341	-0.656	-0.026	0.234	0.036	12.580	48.409	-25.830
2	-1.423	-1.777	-1.069	0.809	0.000	14.117	93.419	-77.324
3	-1.923	-2.390	-1.456	0.816	0.000	18.629	116.721	-100.363
4	-0.788	-1.010	-0.567	0.768	0.000	8.841	47.593	-37.160
5	-0.710	-0.892	-0.529	0.801	0.000	7.227	41.745	-33.659
6	-0.675	-0.903	-0.448	0.698	0.000	9.071	48.164	-29.914
7	-0.682	-0.876	-0.487	0.763	0.000	7.761	44.567	-28.642
8	-0.871	-1.090	-0.653	0.806	0.000	8.723	55.356	-39.534
9	-0.883	-1.140	-0.627	0.756	0.000	10.234	54.756	-41.127
10	-0.909	-1.129	-0.688	0.817	0.000	8.787	56.480	-42.152
11	-0.855	-1.098	-0.612	0.765	0.000	9.687	52.945	-39.646
12	-0.811	-1.016	-0.606	0.803	0.000	8.188	50.782	-34.577
13	-0.771	-1.024	-0.518	0.708	0.000	10.098	60.290	-47.494
14	-1.580	-2.076	-1.083	0.726	0.000	19.809	116.962	-83.785
15	-1.933	-2.359	-1.506	0.843	0.000	17.009	122.032	-91.559
16	-0.334	-0.476	-0.192	0.591	0.000	5.661	36.351	-21.569
17	-0.065	-0.138	0.009	0.169	0.080	2.920	16.234	2.914
18	-0.156	-0.287	-0.025	0.338	0.023	4.791	21.693	-0.671
19	-0.183	-0.286	-0.079	0.529	0.002	3.781	24.693	-1.984
20	-0.118	-0.233	-0.002	0.272	0.046	4.227	19.751	3.766
21	-0.062	-0.149	0.025	0.154	0.148	3.186	12.559	2.712
22	0.103	-0.018	0.224	0.222	0.089	3.927	17.815	14.010

Tabla 18: Resultados del análisis de la evolución del frente dunar.

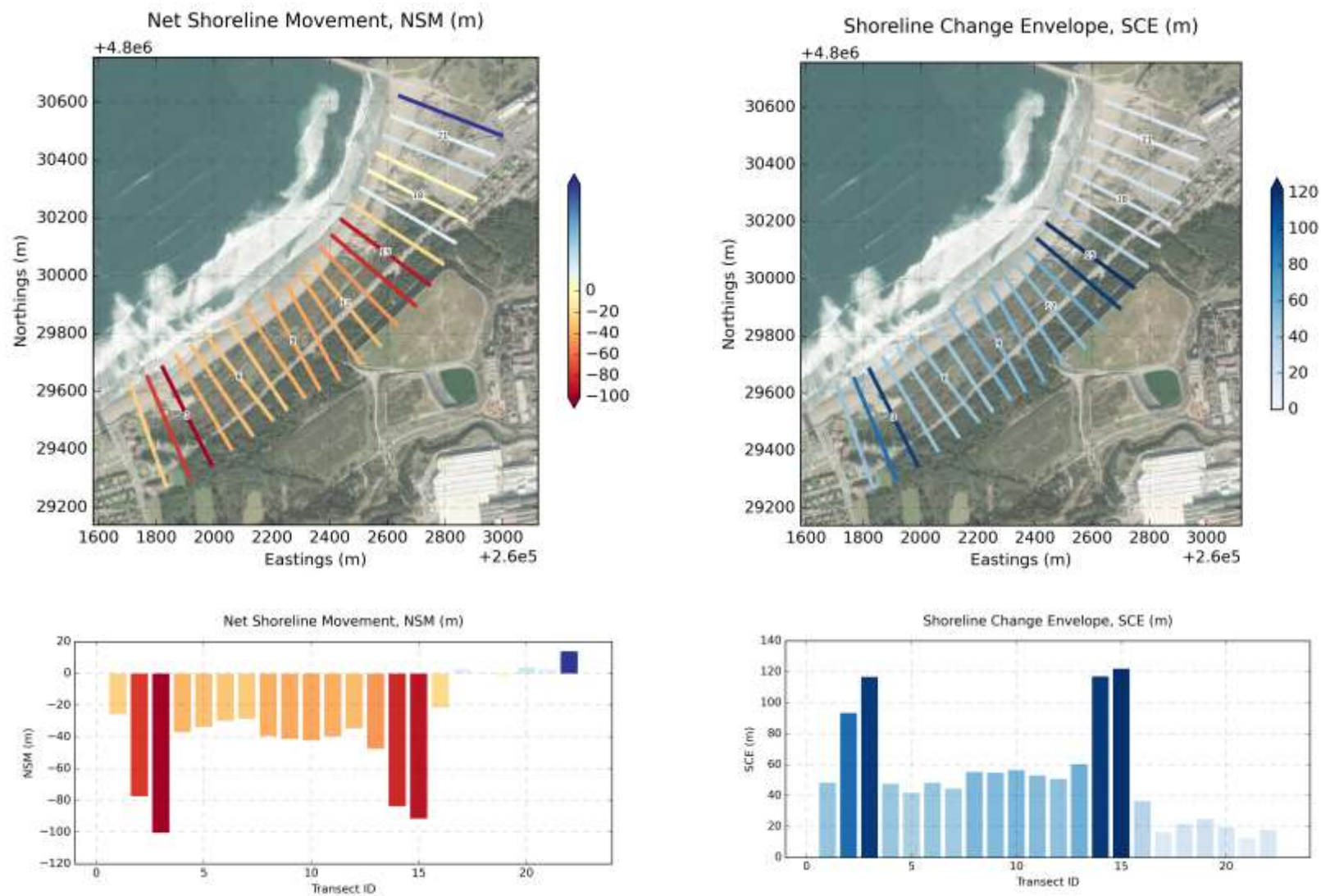


Ilustración 83: Movimiento neto del frente dunar (NSM) y envoltente de cambio del frente dunar (SCE)

7.2 Evolución del frente dunar con base en levantamientos topográficos

7.2.1 Metodología

El análisis de parámetros morfométricos constituye una herramienta importante para la evaluación cuantitativa del estado morfodinámico de sistemas dunares costeros. La alometría estudia las relaciones proporcionales entre diferentes dimensiones morfométricas de las dunas, proporcionando indicadores objetivos sobre el equilibrio sedimentario y la capacidad de respuesta del sistema ante perturbaciones ambientales.

En el contexto del cordón dunar frontal de El Espartal, estos parámetros permiten establecer un diagnóstico del estado actual del sistema en comparación con las condiciones de equilibrio esperables bajo el régimen hidrodinámico y eólico local. Las relaciones alométricas actúan como indicadores sensibles de los procesos de erosión, acumulación y redistribución sedimentaria que caracterizan la dinámica costera de la zona.

Las condiciones de equilibrio se establecen mediante la aplicación de modelos empíricos que relacionan las características morfodinámicas con las forzantes ambientales locales. Estos modelos consideran parámetros como la velocidad media del viento, el tamaño de grano del sedimento, la altura significativa del oleaje y la disponibilidad sedimentaria de la playa subaérea.

La comparación entre los parámetros morfométricos actuales y los valores de referencia para condiciones de equilibrio revela el grado de ajuste o desviación del sistema respecto a su estado óptimo. Las desviaciones significativas indican:

- Déficit Sedimentario: Caracterizado por relaciones H/W superiores a las de equilibrio y volúmenes reducidos, sugiere procesos erosivos predominantes o insuficiente aporte eólico desde la playa.
- Superávit Sedimentario: Manifestado por incrementos en la relación V/H y expansión horizontal del cordón, indica condiciones favorables para la acumulación y crecimiento dunar.
- Desequilibrio Direccional: Reflejado en alteraciones del índice de asimetría, señala cambios en el régimen eólico dominante o efectos de canalización del viento por la topografía local.

La evaluación de la tendencia temporal de estos parámetros permite identificar la dirección de evolución del sistema, estableciendo si se encuentra en proceso de recuperación, degradación o mantenimiento del equilibrio morfológico, a fin de relacionar su estado con las obras de dragado ejecutadas por el puerto.

Almeida et al. (2019) identificaron relaciones entre los parámetros morfométricos de dunas frontales en equilibrio y las interrelaciones entre los parámetros morfométricos de altura, ancho, volumen y pendiente máxima (relaciones alométricas) en seis playas ubicadas a lo largo de la costa norte de España (costas de Galicia, Asturias y Cantabria). En base a eso, propusieron relaciones alométricas entre los parámetros físicos de dunas frontales en equilibrio.

Posteriormente, Pellón et al. (2020) propusieron un modelo conceptual a largo plazo para explicar las diferentes características morfológicas de la forma en estado estacionario de las dunas frontales como función de la acción conjunta de las dinámicas marina y eólica. El procedimiento propuesto por Pellón et. Al (2020) consistió en seleccionar las mismas seis playas estudiadas por Almeida et al., las

cuales estaban bien conservadas, aproximadamente en un estado estable y sin alteraciones humanas en la década anterior a la fecha de levantamiento topográfico cuando se midieron los datos utilizados en el estudio.

En este apartado se tomarán los levamientos topográficos disponibles sobre el cordón frontal dunar de la playa de El Espartal, para calcular relaciones alométricas y evaluar su relación con la acción conjunta de las dinámicas marina y eólica. Se comparará el estado morfodinámico actual, con aquel correspondiente a una duna en equilibrio, para conocer el grado de alteración del cordón dunar respecto a su estado estacionario, tomando como referencia las seis playas analizadas en los artículos de referencia.

7.2.2 Parámetros morfométricos de la duna

El siguiente esquema representa una sección transversal de un cordón dunar y de los parámetros morfométricos de una duna (Almeida et al. 2019).

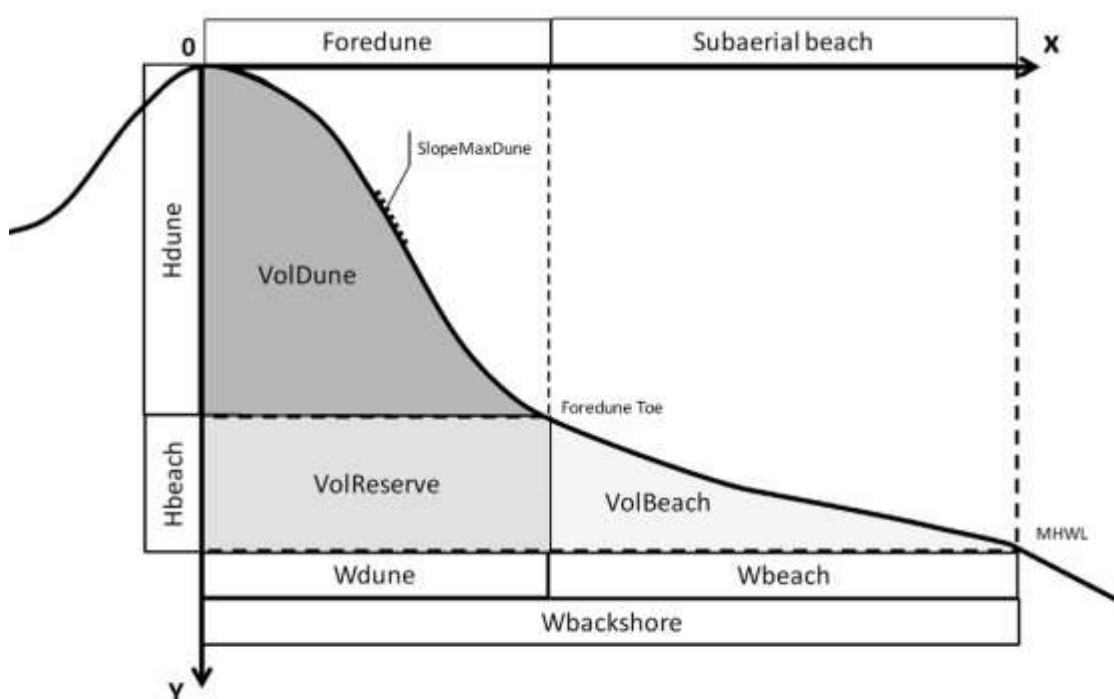


Fig. 2. Schematic cross-shore profile and the beach and foredune morphometric parameters.

Ilustración 84: Sección transversal de cordón dunar y parámetros morfométricos (Almeida et al. 2019).

Donde:

- W_{duna} = ancho de la duna frontal: distancia horizontal entre el pie y la cresta de la duna frontal.
- W_{playa} = ancho de la playa: distancia horizontal entre el MHWL y el pie de la duna frontal.
- $W_{intermareal}$ = ancho de la zona intermareal superior (backshore): distancia horizontal entre el MHWL y la cresta de la duna ($W_{playa} + W_{duna}$).
- H_{duna} = altura de la duna: distancia vertical entre el pie y la cresta de la duna frontal.

- H_{playa} = altura de la playa: distancia vertical entre el MHWL y el pie de la duna frontal.
- $VolDuna$ = volumen de la duna: área integrada numéricamente entre el perfil de la duna y la línea horizontal al nivel del pie de la duna (m^3/m).
- $VolPlaya$ = volumen de la playa: área integrada numéricamente entre el perfil de la playa y la línea horizontal al nivel de MHWL (m^3/m).
- $VolReserva$ = volumen de reserva: área que incluye, horizontalmente, el ancho de la duna y, verticalmente, la altura de la playa, que no pertenece ni a la duna ni a la playa subaérea (m^3/m).
- $VolIntermareal$ = volumen total de la zona intermareal superior: suma de $VolDuna + VolPlaya + VolReserva$.
- $PendienteMáxDuna$ = pendiente máxima de la duna frontal entre dos puntos topográficos.

Pie de duna

La definición del pie de duna es sumamente importante pues si se coloca la duna más cerca al mar, llegarán inundaciones en el periodo de retorno de 10 años que erosionarían directamente la duna, como se ha mencionado en el apartado 5.1.2, cuando se explicó que en pleamar el nivel de agua puede llegar hasta el pie.

De acuerdo con Pellón et al. (2020) podemos conocer el pie o inicio de la duna a partir de conocer el total water level (TWL) asociado al periodo de retorno de 10 años.

Las siguientes figuras fueron propuestas por Pellón et al. (2020), y representan la comparación de los niveles del pie de duna con los niveles de agua totales para periodos de retorno (TR) de 2 y 10 años, para las seis playas estudiadas a lo largo de la costa norte de España. A la izquierda, se observa que los pies de dunas de las playas se encuentran ligeramente por encima del nivel de agua de dos años de periodo de retorno, indicando que las dunas se establecen a un nivel que supera las condiciones marinas frecuentes. Por otro lado, a la derecha, se grafica la relación con un nivel de agua de 10 años de periodo de retorno, notando que existe un muy buen ajuste con la cota del pie de duna. Cabe mencionar que la playa de Bayas, la más cercana a la zona de estudio, se encuentra ligeramente por encima de la línea de ajuste, para un nivel de agua TR 10 de aproximadamente 4.1m referido al NMM, y una cota de pie de duna de aproximadamente 4.4 m también referidos al NMM, esto es un nivel de +6.59m y un pie de duna en +6.89m referidos al cero local de Avilés.

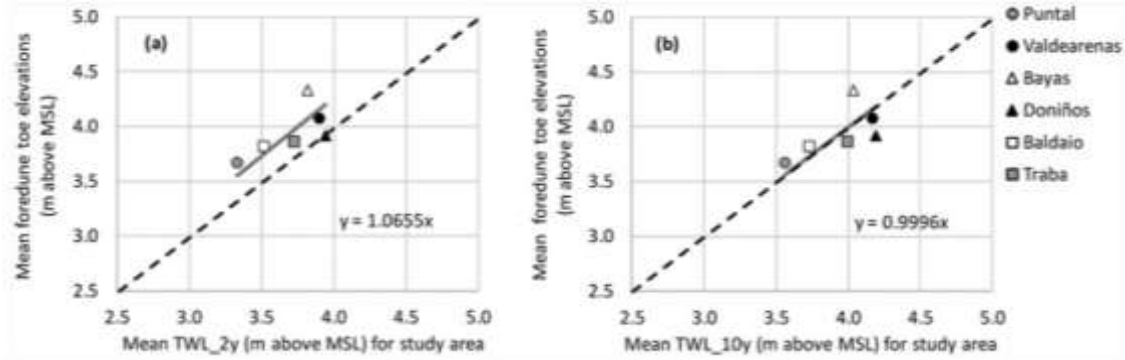


Ilustración 85: Relación entre el nivel del pie de duna y nivel de agua para períodos de retorno de 2 años (izquierda) y 10 años (derecha). Fuente: Pellón et al. (2020).

A partir del ajuste presentado en la figura anterior se tiene:

$$Z_{foredune\ toe} = 0.9996(TWL_{10y})$$

El TWL se calcula como el efecto combinado de la marea astronómica (AT), la marea de tormenta (SS) y la sobreelevación del oleaje (Ru).

Para estimar el TWL, los datos de marea astronómica y marea meteorológica se obtuvieron de la base IH-DATA, como se ha mencionado en el punto 5.1.1. Para calcular la elevación de oleaje (run-up) se aplicó la formulación de Stockdon et al. (2006), donde β = pendiente de la playa; H_0 = altura de ola en aguas profundas (se verificó el régimen de aguas profundas, y aquellas H_s que no lo estaban fueron transformadas inversamente usando teoría lineal de olas, a través del coeficiente de shoaling); L_0 = longitud de ola en aguas profundas (calculada mediante la relación de dispersión).

$$R_u = 1.1 \left(0.35\beta(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right)$$

El promedio de los valores de Ru obtenidos fue de 0.78 m, mientras que el máximo fue de 3.049 m, el mínimo de 0.08 m, el Ru50% fue de 0.705m y el Ru95% de 1.49 m.

β se calcula como la pendiente media entre el nivel de baja marea y el nivel de pleamar a lo largo del tramo de playa donde ocurre el run-up, resultando en 0.02.

De esta manera, se calcularon los niveles totales del agua (TWL) horarios, y los valores máximos anuales de nivel del agua durante 21 años fueron ajustados a una Distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV).

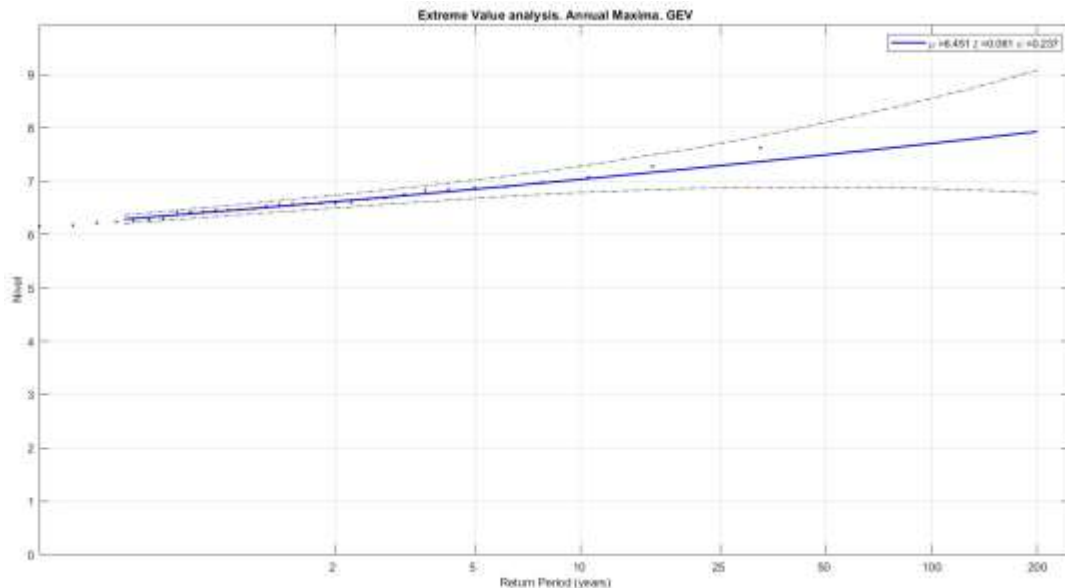


Ilustración 86: Análisis de extremos de niveles. GEV

Período de retorno (años)	Nivel (m) (GEV)
2	6.5388
3	6.6709
5	6.8233
10	7.0227
15	7.1393
20	7.2227
25	7.2881
30	7.3419
40	7.4277
50	7.4951
100	7.5892
200	7.7096

Tabla 19: Niveles de marea para distintos períodos de retorno.

Se adoptará como nivel para un tiempo de retorno de 10 años, +7.02m referidos al cero local de Avilés. Con este valor, se obtiene:

$$Z_{foredune\ toe} = 0.9996 \times 7.0227$$

7.02m referidos al cero local y 4.53m referidos al NMM local

Por su parte, el MHWL se calculó como el promedio de las pleamares detectadas en la serie histórica disponible de niveles, considerando la marea astronómica y la marea meteorológica, resultando ser +3.80m.

Volumen frontal de la duna

Podemos conocer el volumen frontal de la duna a partir del Total Water Level (TWL) asociado al periodo de retorno de 10 años. La siguiente figura presenta relaciones alométricas entre el volumen de las dunas frontales y los niveles extremos de agua marina, mostrando cómo el tamaño de las dunas se relaciona con la energía de los eventos de tormenta. La figura de la izquierda muestra el comportamiento

promedio de cada playa completa, mientras que la de la derecha incluye la variabilidad entre diferentes secciones dentro de cada playa. En ambos se observa una relación exponencial: el volumen de la duna crece exponencialmente con el nivel de agua extremo.

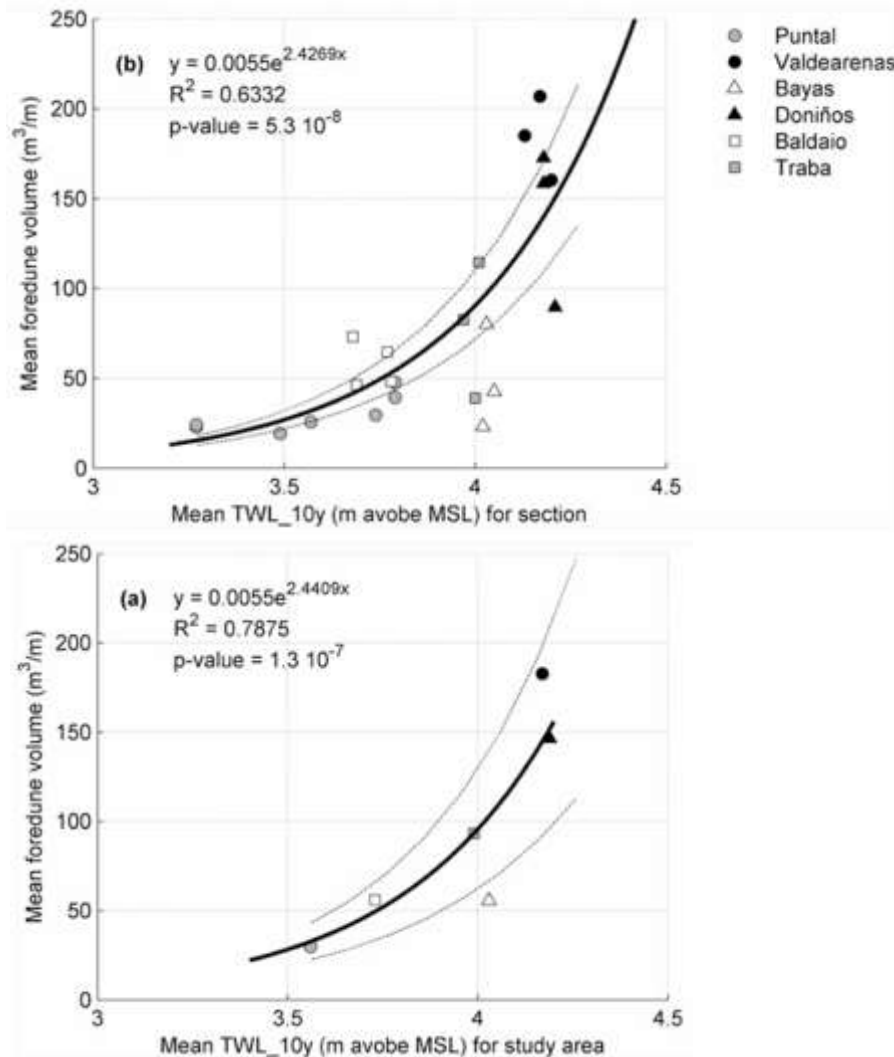


Ilustración 87: Relación entre el volumen de la duna frontal y el período de retorno de 10 años del nivel total de agua (TWL_10y; metros sobre el nivel medio del mar) para: (a) valor medio para cada área de estudio (figura inferior), (b) valor medio para cada sección de línea transversal (figura superior). Fuente: Pellón et. al (2020).

A partir de la gráfica anterior, se tiene:

$$V_{\text{foredune}} = 0.0055e^{2.4409(TWL_{10y})}$$

$$V_{\text{foredune}} = 0.0055e^{2.4409 \times (4.53)} = 348.72 \text{ m}^3/\text{m}$$

Esto significa que cuando el nivel total de agua de 10 años de período de retorno (TWL_10y) es de 4.53 metros sobre el nivel medio del mar, el modelo predice un

volumen de duna frontal de aproximadamente 348.72 metros cúbicos por metro lineal de duna.

A partir de la definición del pie de la duna se pueden definir otros parámetros de forma como la altura, el volumen y el ancho (véase siguiente apartado), y con ellos, verificar las relaciones que se observan en la tabla a continuación, extraída de la publicación de Almeida et al. (2019).

Relación alométrica	Ecuaciones que representan el mejor ajuste	R ²	RMSE	ρ	Correlación
Wdune vs Hdune	$y = 0.14x + 0.70$	0.62	1.11	0.76	Fuerte
Mean Wdune vs Mean Hdune	$y = 0.21x - 1.43$	0.88	0.73	0.94	Muy fuerte
VolDune vs Mean Wdune	$y = 5.061x^{.47}$	0.86	0.67	0.91	Muy fuerte
Mean VolDune vs Mean Hdune	$y = 0.44x^{.54}$	0.95	0.45	0.99	Muy fuerte
VolDune vs Wdune	$y = 4.21x^{.44}$	0.90	3.24	0.93	Muy fuerte
Mean VolDune vs Mean Wdune	$y = 5.00x^{.40}$	0.96	1.95	0.96	Muy fuerte
Hdune vs Mean SlopeMaxDune	$y = 7.01x + 7.59$	0.46	3.88	0.68	Fuerte
Mean Hdune vs Mean SlopeMaxDune	$y = 2.22x + 6.37$	0.94	1.17	0.97	Muy fuerte

Tabla 20: Relaciones alométricas propuestas por Almeida et al. (2019) corregida.

Almeida et al. (2019) definieron, en base al estudio de los perfiles topográficos de las seis playas del norte de España, que, en promedio:

- El volumen de la duna frontal representa el 45% del volumen total de la zona intermareal.
- La playa contribuye con un 21%.
- El volumen de reserva aporta el 34%

El ancho de frente de duna representa aproximadamente el 50% del ancho total de la zona intermareal.

7.2.3 Medición de parámetros físicos de las dunas

Con el fin de obtener los parámetros físicos de las dunas, se ha trabajado con los levantamientos topográficos aportados por la APAV, para representar y analizar los perfiles transversales del cordón dunar en el periodo 2021-2024. Tal y como se muestra en la siguiente figura, los perfiles analizados (22) son los mismos que se emplearon para analizar la evolución del frente dunar con base en ortofotos (ver Ilustración 81). Adicionalmente, se trabajó con los levantamientos de los años 2021,2022 y 2023 ya que eran los únicos cuyas extensiones incluyen el área del cordón dunar.

Para caracterizar los perfiles en cada una de las campañas, se ha hallado la intersección de cada uno de los perfiles seleccionados (Ilustración 81) con el modelo de terreno obtenido para cada campaña. Posteriormente, para cada perfil y cada campaña, en primer lugar, se identificó la cota máxima del perfil (cresta de la

duna). Posteriormente, se definió el pie de duna con base en un análisis visual de cada uno de los perfiles, identificando el cambio de curvatura. De esta manera, definidas la cresta y el pie de duna, se ha medido el ancho de duna, su altura, y su altura, al igual que las áreas correspondientes a la duna, al sector de reserva y a la playa (ver Ilustración 84 y definiciones asociadas).

De esta manera, en el apartado 12.3 se representaron los 22 perfiles para los años 2021 a 2024, y los mismos se pueden observar en el anexo a este informe.

La tabla a continuación incluye los pies de duna definidos para cada perfil, en cada año.

Nº de perfil	COTA DE PIE DE DUNA			
	2021	2022	2023	2024
1	5	5.5	6.8	5.9
2	5	5.8	6.8	6.5
3	5	5.8	6	6.5
4	5	5.5	6.5	6.5
5	5	5.4	6	7
6	5	5	6	7
7	5	5.8	6	6.6
8	5	5.8	5.8	5.5
9	5	5.8	6	6
10	5	5.5	6.5	5.8
11	5	5.5	6.6	5.8
12	5	5	6.8	5.8
13	5	6.5	6.6	5.8
14	5	5.4	6.5	6
15	5	5.4	6.3	5.65
16	5	5.4	5	5.6
17	5	5	6	5.5
18	5	5.5	6.8	6
19	5	5.6	7.02	6
20	5	5.6	7.02	6
21	5	6.9	7.02	5
22	5.8	6.5	7.3	5

Tabla 21: Cotas de pie de duna definidas para cada perfil, para cada año.

A modo de ejemplo, en las siguientes figuras (Ilustración 88 e Ilustración 89) se muestran el perfil 1 y el perfil 11 para las campañas de 2023 y 2024, con sus correspondientes zonificaciones, áreas y volúmenes estimados en el presente trabajo. En ambos ejemplos se muestra en trazo rojo, el perfil derivado del levantamiento topográfico correspondiente al año 2023 y en azul, el correspondiente al año 2024 (figuras de la izquierda). La línea vertical roja indica la ubicación del pie de duna, para cada año, mientras que la línea azul punteada señala la pleamar media definida al final del apartado 7.2.2. En la figura de la derecha, se pueden observar ambos perfiles juntos a fin de poder compararlos, observando que, en ambos el perfil de 2024 cubre al de 2023, indicando aumento del volumen de arena disponible. El área sombreada en amarillo corresponde a la sección transversal de la duna, mientras que el área en celeste es el volumen (por metro lineal de duna) de reserva y, finalmente, el área en rojo indica el volumen por metro lineal de playa.

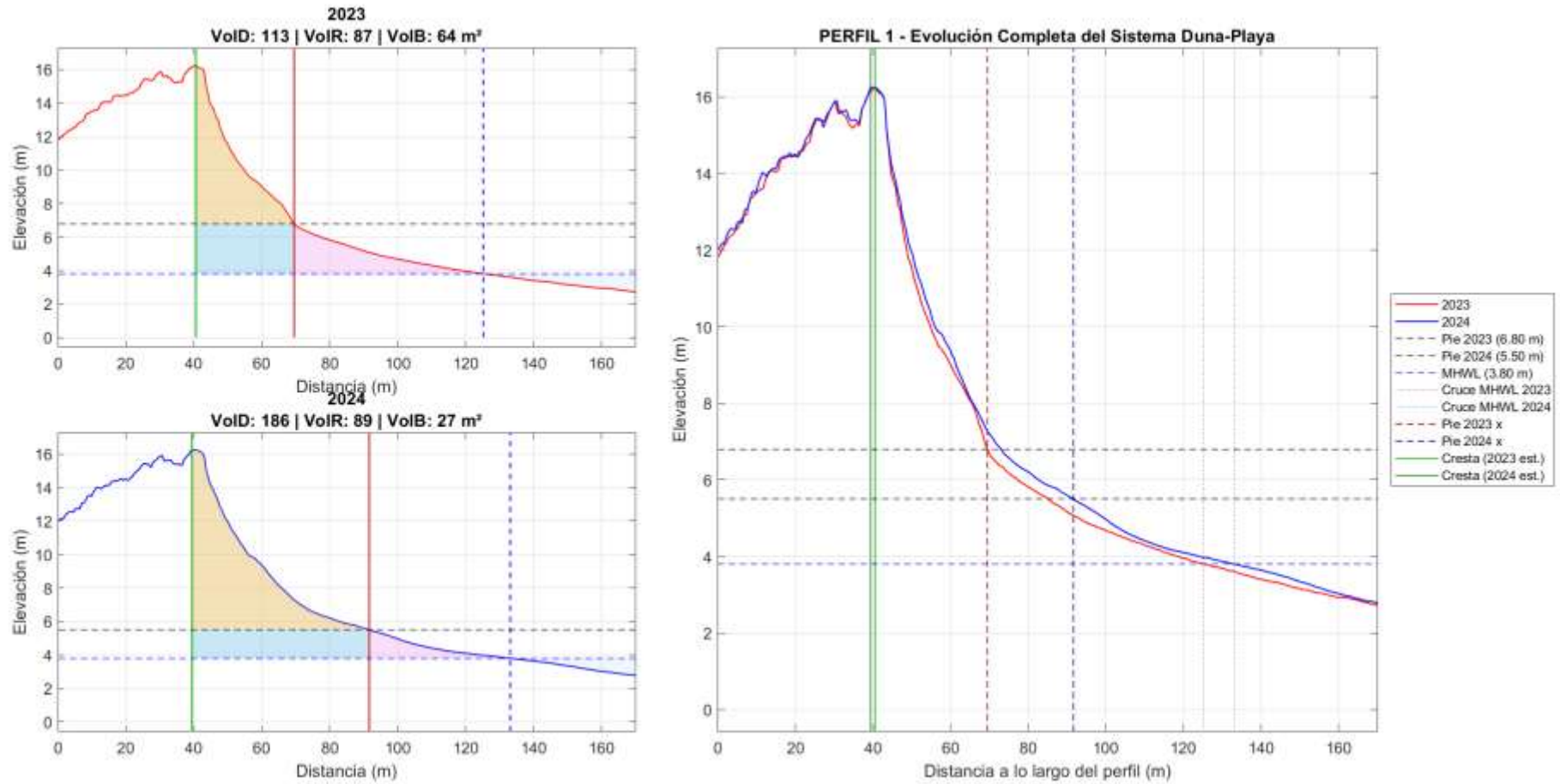


Ilustración 88: Perfiles transversales del primer transecto para los años 2023 y 2024.

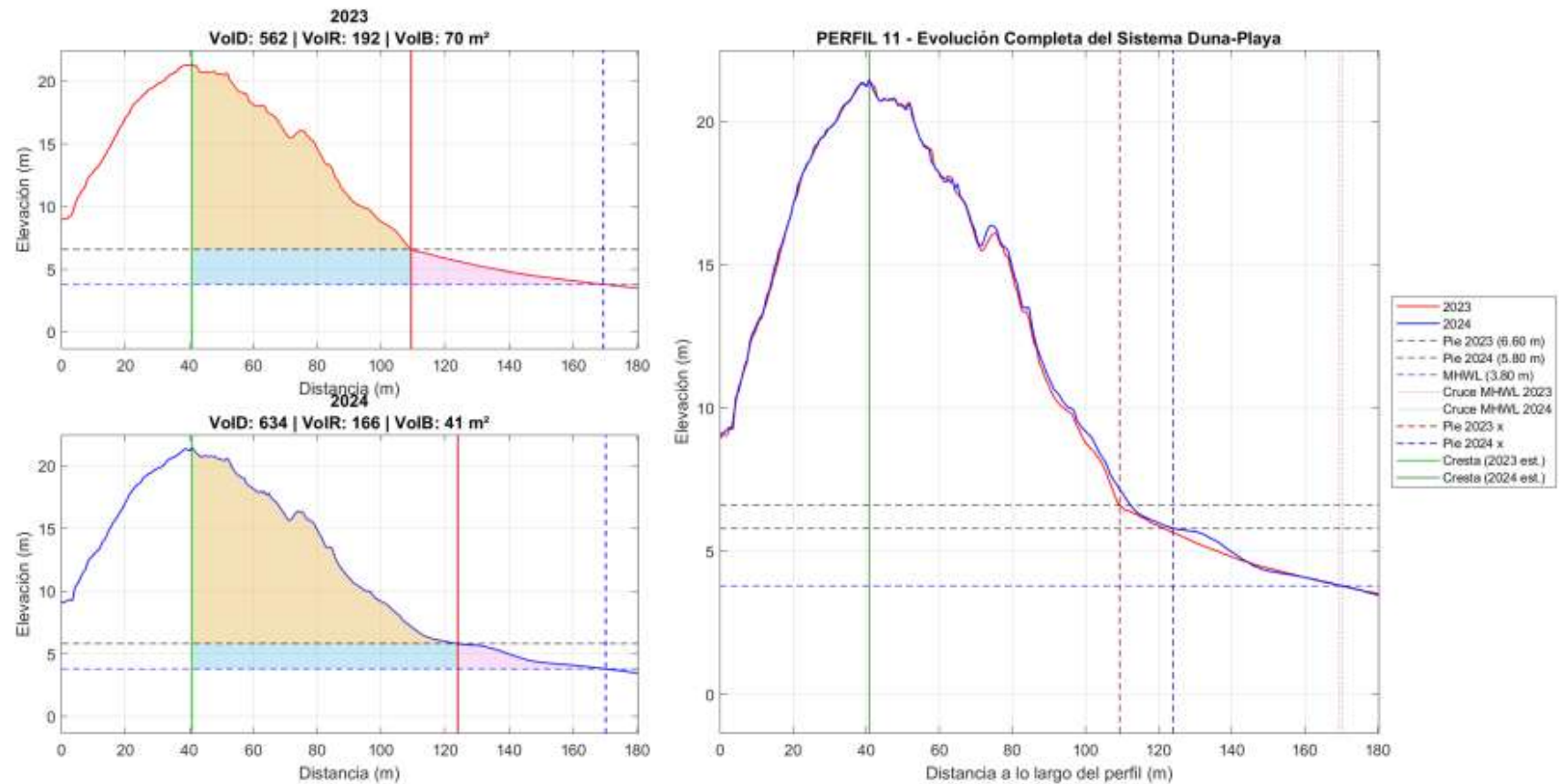


Ilustración 89: Perfiles transversales del transecto N°11 para los años 2023 y 2024.

En el gráfico a continuación se plasma la evolución del pie de duna en el periodo 2021-2024 para los distintos perfiles.

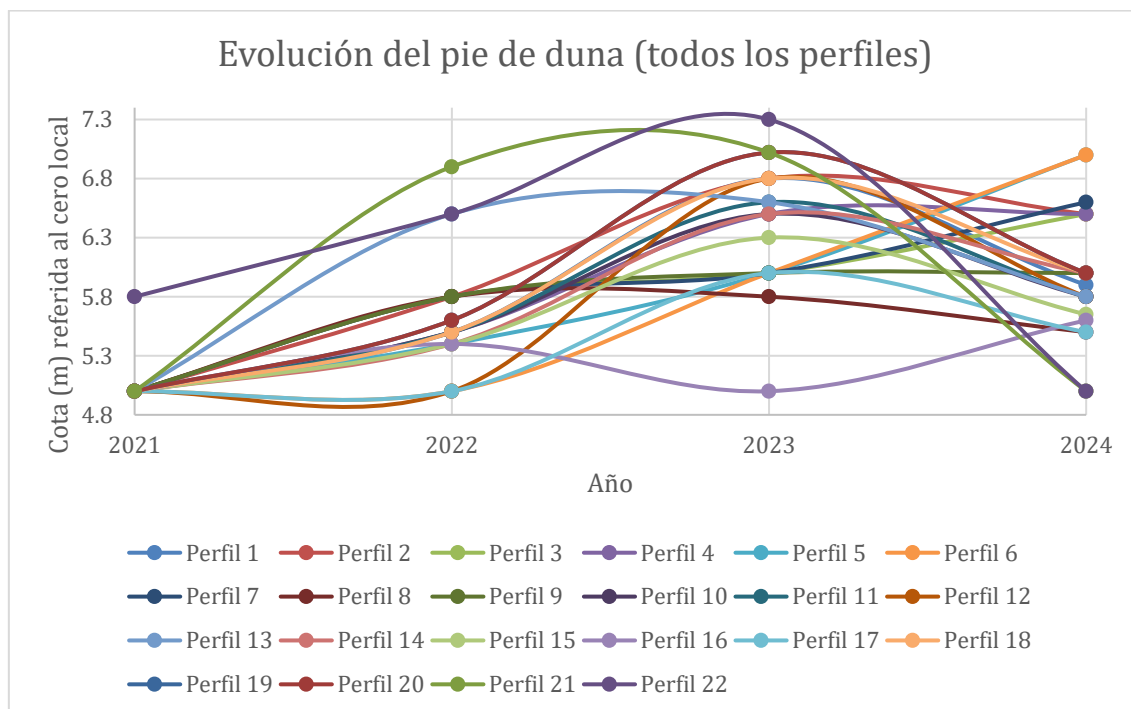


Ilustración 90: Evolución del pie de duna (todos los perfiles). Fuente: Elaboración propia

Dentro de este gráfico se observan dos grupos de tendencias. Por un lado, la mayoría de los perfiles (todos salvo 5, 6, 7 y 16) han disminuido la cota de su pie de duna respecto a 2023, cuando venían aumentando desde 2021. Sobre todo, los perfiles 21 y 22, que han experimentado un gran cambio, de 7.02 m y 7.3 m respectivamente a 5 m. Habrá que analizar con los futuros levamientos si esta tendencia a la baja se mantiene. Por otro lado, los perfiles 5, 6, 7 y 16 han aumentado la cota de su pie de duna respecto a los años anteriores.

Analizando los valores de los volúmenes obtenidos, se observa de forma generalizada una tendencia a mantenerse constante desde el año 2021, sólo en el caso del perfil 12 se registró un descenso marcado en el año 2023, que ha recuperado en 2024.

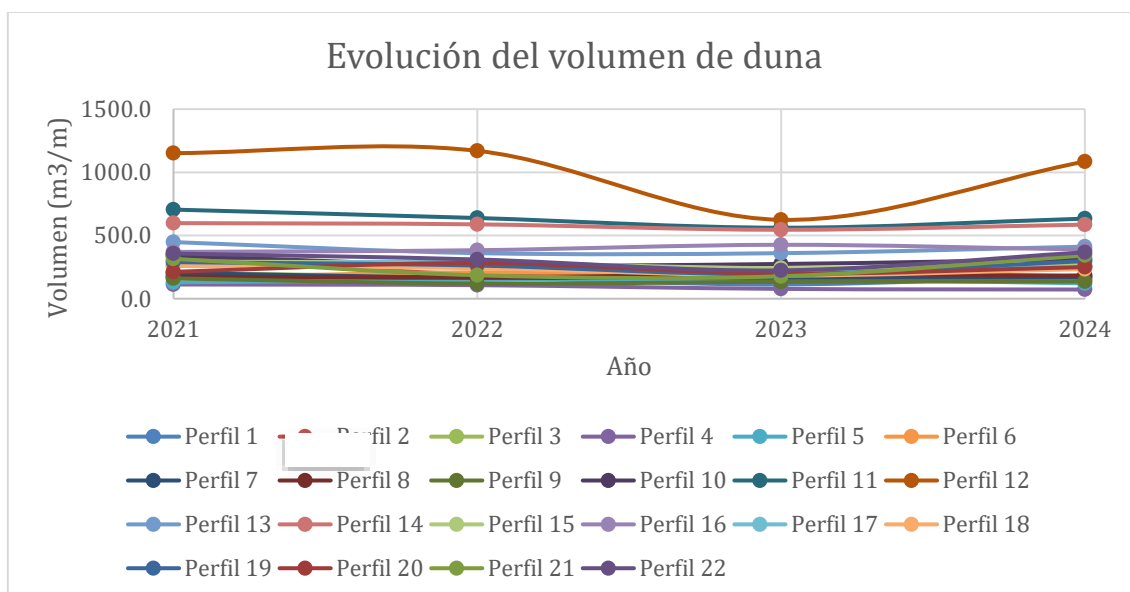


Ilustración 91: Evolución del volumen de dunas. Fuente: Elaboración propia.

Los valores promedio de los volúmenes para cada año son de 330 m³/m/año en el 2021, 305 m³/m/año en 2022, 256 m³/m/año en 2023 y 312 m³/m/año en 2024. Esta tendencia coincide con la observada en la evaluación del frente dunar con base en el estudio de INDUROT (2017).

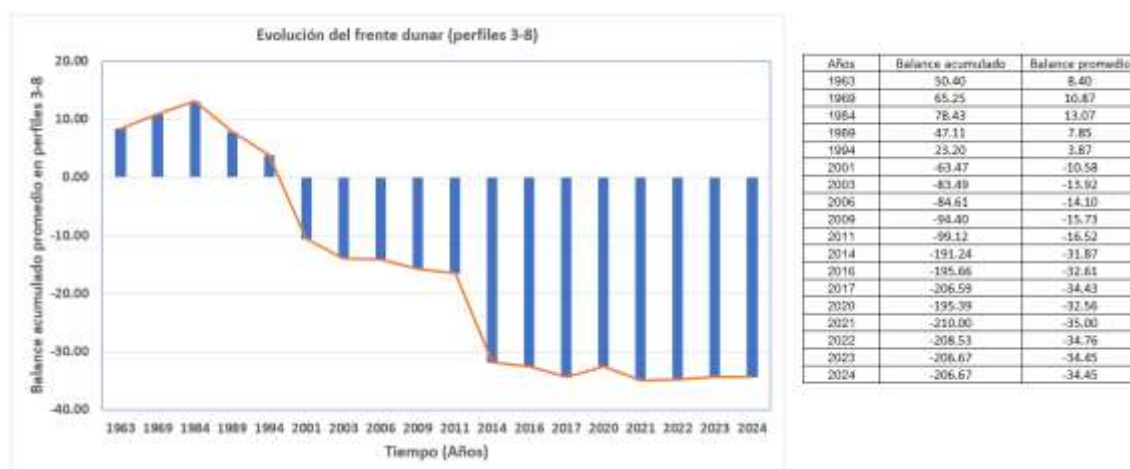


Ilustración 92: Evolución del frente dunar (perfiles 3-8), con base en el estudio de INDUROT (2017)

La evolución del volumen de reserva entre 2021 y 2024 (Ilustración 93 e Ilustración 94) muestra un comportamiento heterogéneo entre los 22 perfiles analizados. En general, los valores se sitúan en un rango de 25 a 230 m³/m.

Algunos perfiles presentan una tendencia creciente, destacando el Perfil 12, que alcanza los valores más altos del periodo (> 210 m³/m). Por el contrario, otros muestran una pérdida progresiva, especialmente el Perfil 4, que desciende hasta valores cercanos a los 45 m³/m en 2024.

La mayoría de los perfiles mantienen fluctuaciones moderadas sin cambios sustanciales en su tendencia, estabilizándose en valores comprendidos entre 90 y 150 m³/m.

Los valores promedio de los volúmenes de reserva para cada año son de 90 m³/m/año en el 2021, 115 m³/m/año en 2022, 130 m³/m/año en 2023 y 120 m³/m/año en 2024.

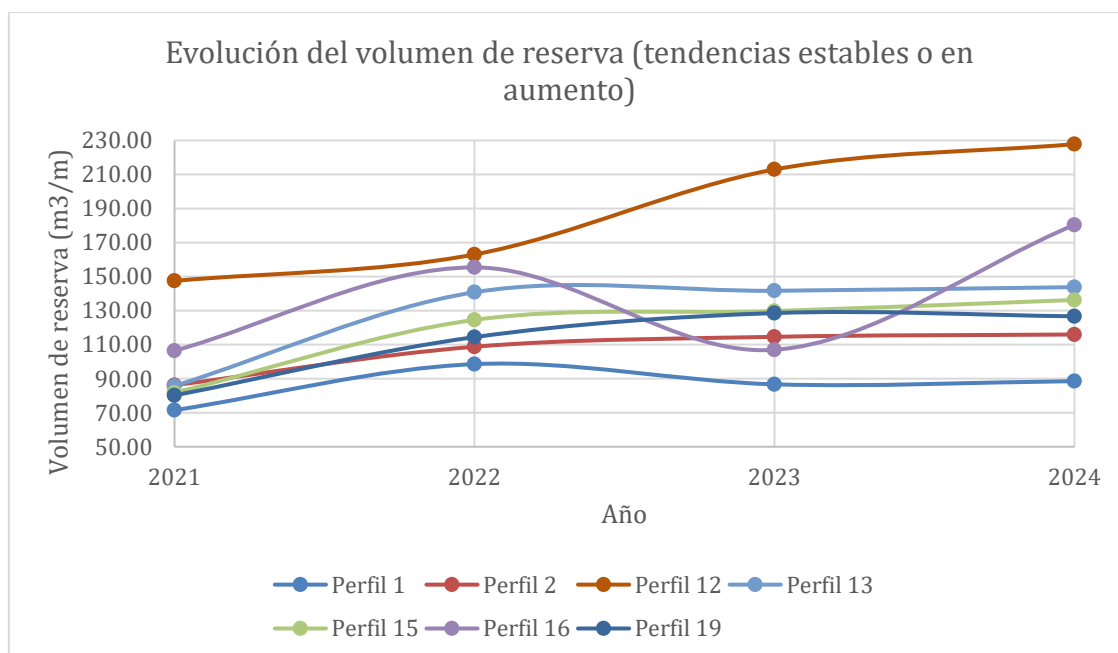


Ilustración 93: Evolución del volumen de reserva (perfiles con tendencia en alza). Fuente: Elaboración propia

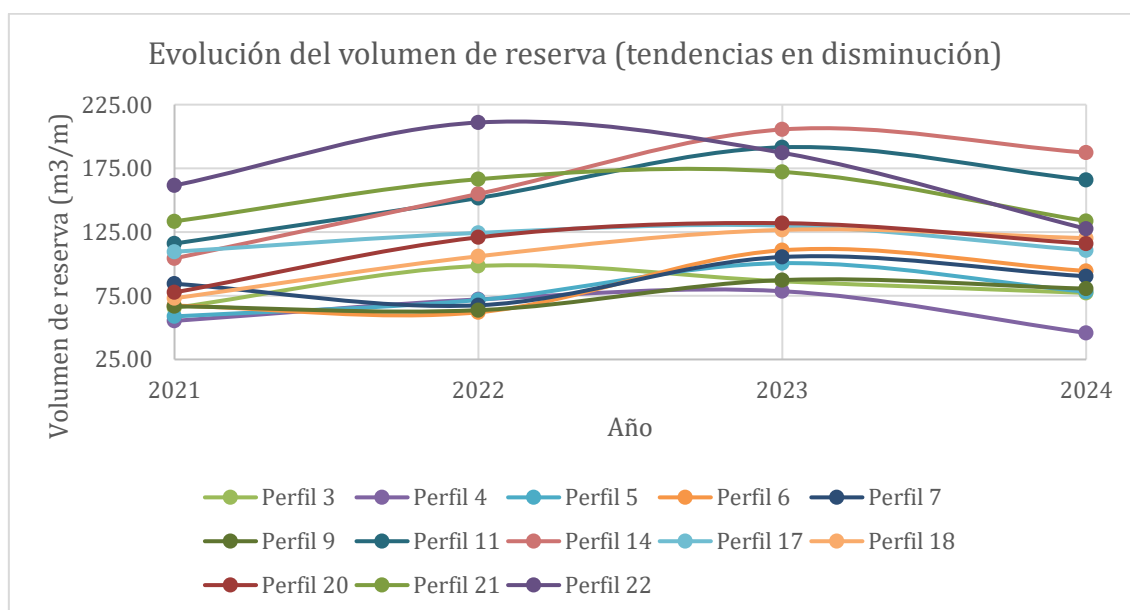


Ilustración 94: Evolución del volumen de reserva (perfiles con tendencia a la baja). Fuente: Elaboración propia

En cuanto al volumen de playa (Ilustración 95), se observa casi todos los perfiles con una tendencia a la baja respecto al volumen de 2023, la misma tendencia que siguen los anchos de playa. Destacan de los perfiles 13,21 y 22, mientras que el resto se mantiene en valores muy similares de entre 10m³/m y 40 m³/m entre los años 2021 y 2022, aumentando en el 2023 a volúmenes de entre 15m³/m a 150m³/m, y disminuyendo en 2024 al rango 25 m³/m- 75 m³/m.

Los valores promedio de los volúmenes de playa para cada año son de 15 m³/m/año en 2021, 35 m³/m/año en 2022, 65 m³/m/año en 2023 y 45 m³/m/año en 2024.

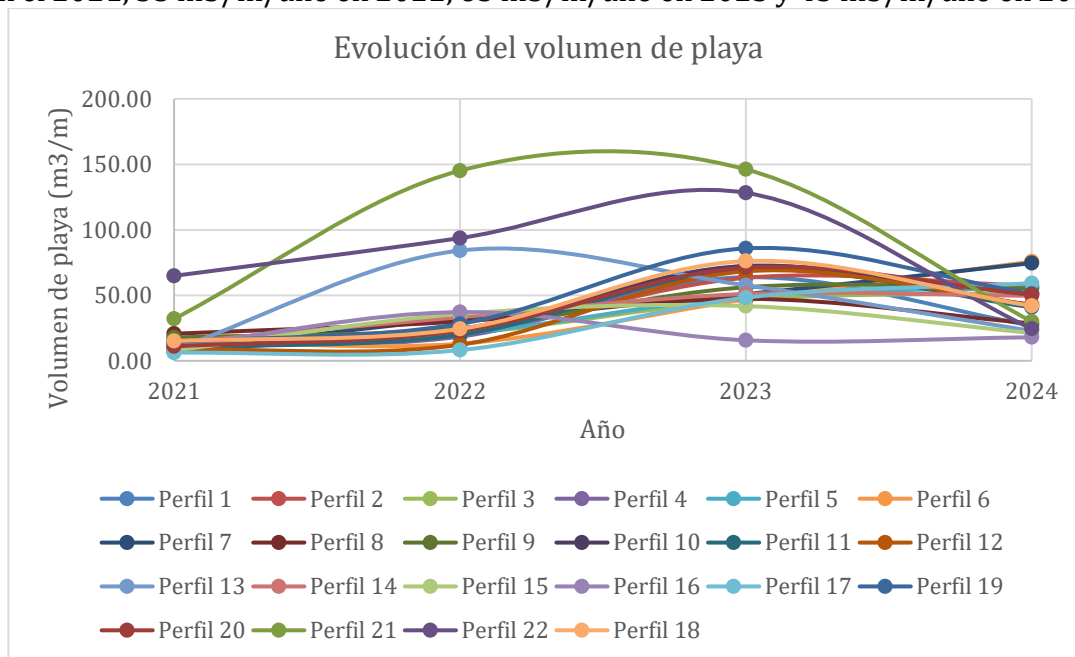


Ilustración 95: Evolución del volumen de playa. Fuente: Elaboración propia

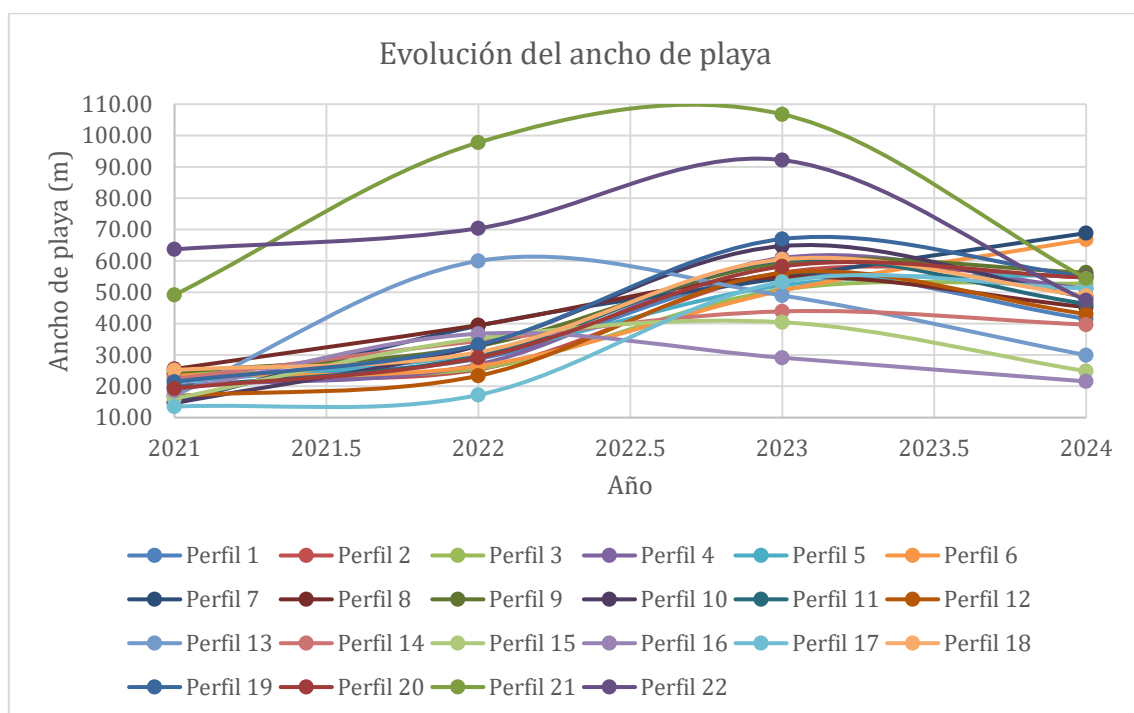


Ilustración 96: Evolución del ancho de playa. Fuente: Elaboración propia

Los anchos de duna medidos en los 22 perfiles se encuentran entre los 20m-100m, siendo los más anchos los correspondientes al sector este, y los menos anchos los vecinos a la zona urbana.

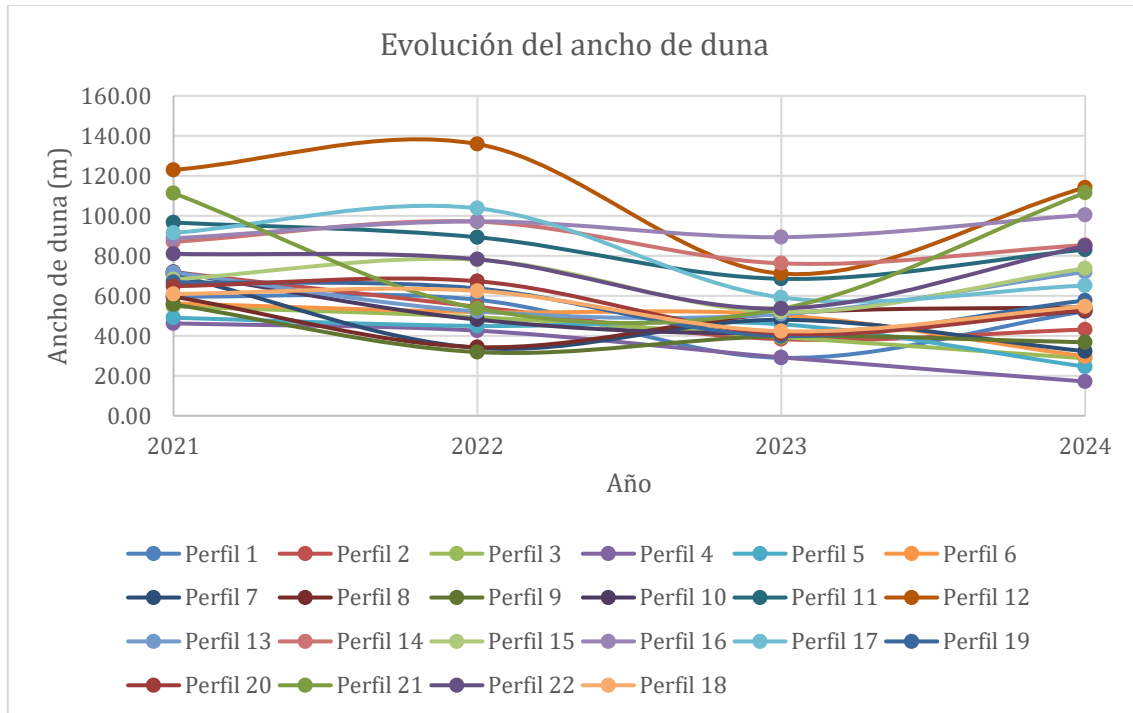


Ilustración 97: Evolución del ancho de la duna. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la altura de las dunas se mantiene desde 2021 dentro de valores estables, entre 7m y 16 m, aunque han disminuido su altura en unos 90 cm en promedio, mientras que los perfiles 16, 17, 21 y 22 han aumentado su altura 30 cm, 5 cm, 46 cm y 68 cm respectivamente. Los perfiles 10, 11, 12 y 19 son los más altos.

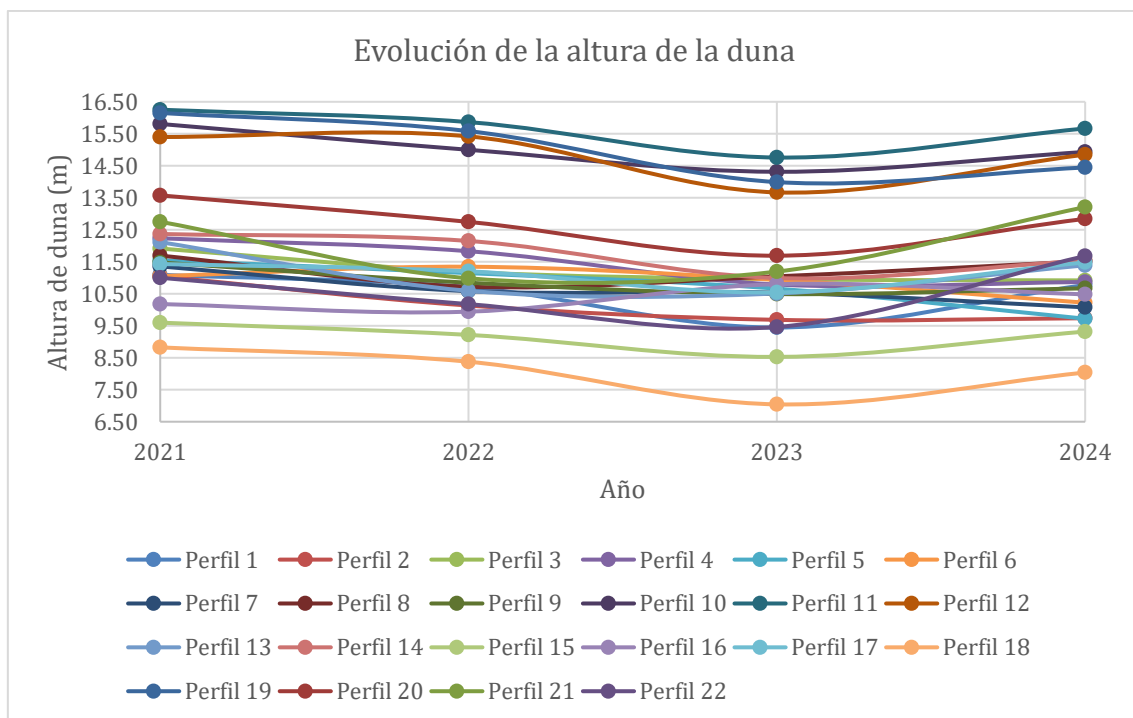


Ilustración 98: Evolución de la altura de duna. Fuente: Elaboración propia

7.2.4 Potencial de deriva eólica

En este apartado se presenta el cálculo del potencial de deriva eólica, siguiendo las mismas premisas que Pellón et al. (2020). El parámetro utilizado para representar la dinámica del viento fue el potencial de deriva eólica (DP), calculado usando la metodología indicada por el Manual de Ingeniería Costera del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (Hsu y Weggel, 2002).

De acuerdo con la ecuación de Hsu (1986):

$$DP_m = K \left(\frac{U_*}{\sqrt{g \cdot D_{50}}} \right)^3$$

donde u_* = velocidad de fricción; D = diámetro medio del grano de arena; g = aceleración de la gravedad; K = coeficiente adimensional de transporte eólico de arena, en función del diámetro del grano de arena D (en mm), dado por:

$$K = e^{-9.63+4.91D}$$

El transporte volumétrico de arena puede obtenerse a partir de la tasa de transporte másico (DP_m) mediante:

$$DP = \frac{DP_m}{\rho_s(1-p)} \text{ (m}^3\text{/m/hora)}$$

donde ρ_s = la densidad de la arena; p = porosidad de la arena (asumiendo una porosidad típica de 0,4).

El transporte eólico de arena debe transformarse a una dirección normal con respecto a la línea de ante-duna, ya que se evalúan perfiles transversales a la costa y los vientos tienen una dirección relativa con respecto a la línea de ante-duna. Según Nickling y Davidson-Arnott (1990), la proporción de sedimento transportado en la playa por unidad de ancho paralela al viento (DP), que se deposita en una unidad de ancho de duna a lo largo de la costa, depende del coseno del ángulo de incidencia del viento:

$$DP_\alpha = DP \cdot \cos \alpha$$

donde DP_α = potencial de deriva eólica dependiendo del ángulo del viento en relación con la línea de costa (m³/m/h);

DP = potencial de deriva eólica;

α = ángulo del viento perpendicular a la costa.

DP_α se calculó para cada dato horario de viento teniendo en cuenta que $u_* \geq u_{*t}$. Luego, se estimó el valor anual total y se calculó el promedio de todos los valores anuales (m³/m/año). El resultado final de esta evaluación es un potencial de deriva anual medio.

Para el cálculo de la velocidad de fricción, los datos de viento fueron obtenidos de la base IH-Data (ver sección 5.1.1). Estas velocidades representan a un punto off-shore, por lo cual se aplicó la corrección de velocidad del viento propuesta por Hsu y Weggel (2002) para trasladar las velocidades a tierra:

$$U_{sea} = 1,62 \text{ m/s} + 1,17 U_{land}$$

$$U_{land} = (U_{sea} - 1,62 \text{ m/s}) / 1,17$$

donde U_{sea} = velocidad del viento sobre el mar; U_{land} = velocidad del viento sobre tierra.

En este trabajo se asumieron las siguientes premisas:

- Solo se tomaron en cuenta los vientos que soplan desde el océano hacia la tierra (vientos onshore).
- No se consideraron los vientos que soplan de forma casi paralela a la línea de costa. Esta decisión se fundamenta en que, según Arens (1996b), los vientos con ángulos comprendidos entre 0° y 15° respecto a la costa inducen un transporte longitudinal de sedimentos en la playa, sin aportar significativamente al desarrollo o recuperación de las dunas. En función de la topografía del área de estudio, se definió el rango de direcciones mostrado en la imagen siguiente, comprendido entre 278° y 10° .



Ilustración 99: Abanico de direcciones considerado para el cálculo del potencial eólico

- Sólo los vientos con velocidad de fricción (u_*) por encima del umbral de tensión de corte pueden generar deriva eólica (Hsu y Weggel, 2002). La tensión de corte crítica (u_{*t}) es dada por Bagnold (1941):

$$U_{*t} = A_t \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)gD}{\rho_a}}$$

donde

ρ_s = densidad másica del sedimento (2,65 g/cm³);

ρ_a = densidad másica del aire (0,00122 g/cm³);

A_t = una constante adimensional (0,118);

g = aceleración de la gravedad (980 cm/s²); D = diámetro medio del grano de arena (en cm).

Para estimar la velocidad de fricción (u_*) para cada dato de la serie histórica de viento, se utilizó la siguiente ecuación propuesta por Hsu y Weggel (2002):

$$U_* = \frac{K(U_{z2} - U_{z1})}{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}$$

donde

k = constante de von Karman (0,4);

U_{z1} = velocidad del viento (cm/s) a la altura 1;

U_{z2} = velocidad del viento (cm/s) a la altura 2 (mayor que la altura 1);

Z_1 = altura 1;

Z_2 = altura 2.

Los datos offshore se obtuvieron a una altura de 10 m ($Z_2 = 10$ m). Hsu midió la velocidad de viento a 2m en distintas costas, y propuso una metodología para definir el perfil de velocidades. Basados en esa fórmula para la altura de 2 m ($Z_1 = 2$ m):

$$u_* = U_{2m} 0.044$$

Donde u_* es la velocidad de fricción y U_{2m} es la velocidad de viento a una altura de 2m.

Combinando las ecuaciones:

$$u_* = \frac{0.4(U_{10} - U_2)}{\ln\left(\frac{10}{2}\right)} = \frac{0.4(U_{10} - U_2)}{1.609} = 0.249(U_{10} - U_2)$$

$$0.249(U_{10} - U_{2m}) = U_{2m} 0.044$$

$$0.249U_{10m} - 0.249U_{2m} = U_{2m} 0.044$$

$$0.249U_{10m} = U_{2m} 0.044 + 0.249U_{2m}$$

$$\begin{aligned} U_{10m} &= 1.176 U_{2m} \\ 0.849 U_{10m} &= U_{2m} \end{aligned}$$

Finalmente,

$$u_* = U_{2m} 0.044 = 0.044 * 0.849 U_{10m} = 0.037 U_{10m}$$

Si u_* es mayor a U_{*t} , se produce movimiento y hay transporte.

Considerando toda la serie histórica, se obtuvo un potencial de transporte de 4.03 m³/m/año, un 31% superior al informado para la playa de Bayas en el trabajo de Pellón et al.(2020) (3.06 m³/m/año).

7.2.5 Relaciones alométricas

Relación entre el pie de duna y el nivel de agua asociado a un TR=10años

El nivel asociado a un período de retorno de 10 años fue de 7.02m referidos al cero local o 4.53m referidos al NMM. Las cotas correspondientes a los pies de duna de cada perfil se observan en la Tabla 21. En la Ilustración 100 se representan dichos valores, y la recta (en rojo) correspondiente a la cota del pie de duna en estado de equilibrio, asumiendo este nivel como el correspondiente a un TR de 10 años. Se observa en dicho gráfico, que casi todas las cotas están por debajo de este valor de referencia. Esto indica que el pie, actualmente, se ubica en cotas más bajas del perfil, y que en un hipotético estado de equilibrio debiera ubicarse aproximadamente entre 0.5m y 2m más arriba.

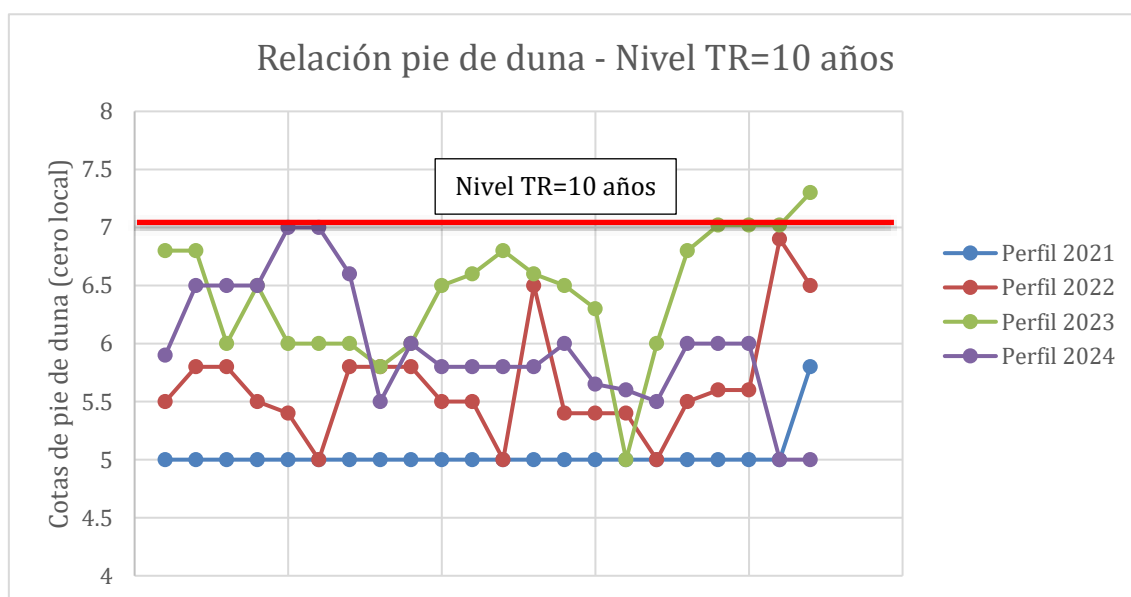


Ilustración 100: Comparación de la cota del pie de duna actual, con el asociado a un estado de equilibrio.

Relación entre el potencial de deriva eólica y el volumen medio de la duna

El potencial de deriva eólica fue de 4 m³/m/año. Considerando las relaciones establecidas para las seis playas del norte de España analizadas por Pellón et al. (2020) (Ilustración 101), se obtiene un volumen medio de la duna de 100 m³/m, si la misma estuviera en equilibrio.

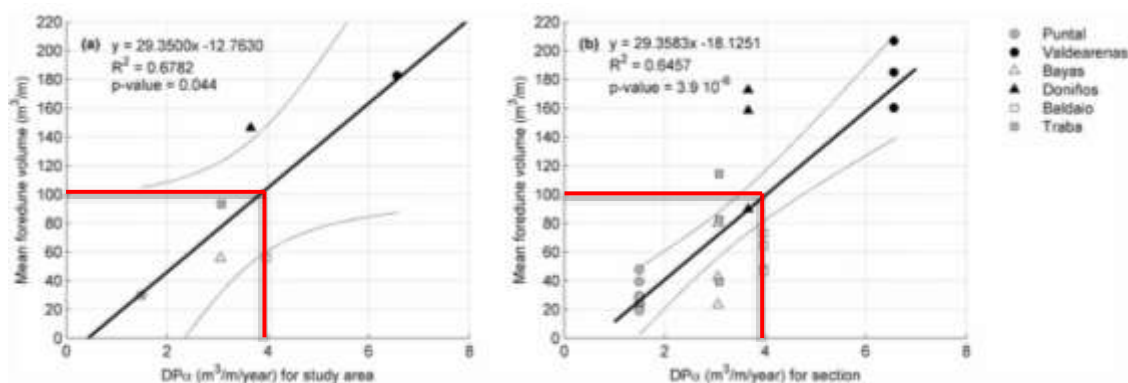


Ilustración 101: Relación entre el potencial de deriva eólica y el volumen medio de la duna

Relación entre el TWL_{10y} y el volumen de la duna

De acuerdo a la relación entre el nivel de agua para una recurrencia de 10 años con el volumen de la duna calculada para las seis playas en equilibrio, se observa que para un TWL_{10y} de 4.53m referidos al NMM, el volumen es superior a 250 m³/m/año, llegando a 300 m³/m/año de acuerdo a lo observado en la tendencia del gráfico, valor que se encuentra en concordancia con los medidos en los perfiles topográficos.

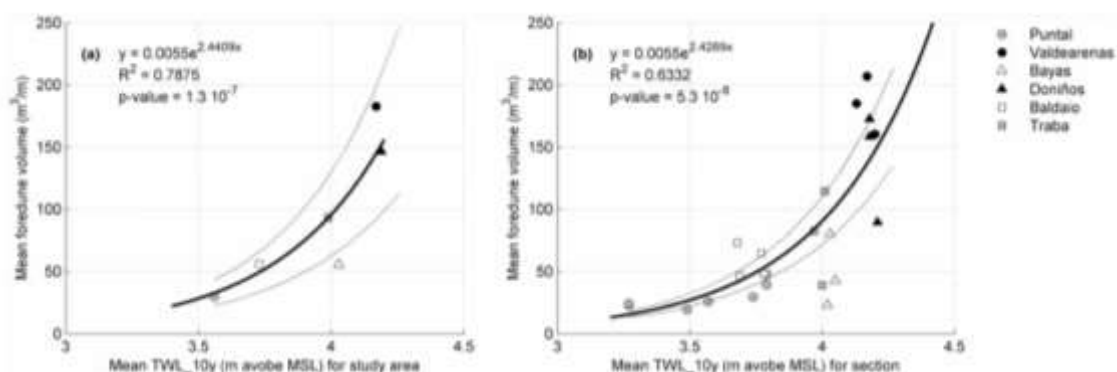


Ilustración 102: Relación entre un TWL_{10y} y el volumen de la duna. Fuente: Pellón et al. (2020)

La relación entre estos dos parámetros se explica por el hecho de que las dinámicas marinas determinan la localización de la duna: cuanto más energéticas son (es decir, mayor TWL_{10y}), más alejada y elevada estará la duna respecto a la línea de costa. Esto significa que la playa seca es más ancha y está situada más arriba en relación con el nivel medio de pleamar, lo que permite un mayor transporte eólico de sedimentos, más próximo al potencial de deriva eólica, y por lo tanto un mayor volumen de la duna frontal (tal como se corrobora en la correlación encontrada entre TWL_{10y} y el volumen de la duna).

Aporte al volumen total de la zona intermareal

Como se mencionó anteriormente, Almeida et al. (2019) definieron, en base al estudio de los perfiles topográficos de las seis playas del norte de España, que, en promedio:

- El volumen del frente dunar representa el 45% del volumen total de la zona intermareal.
- La playa contribuye con un 21%.
- El volumen de reserva aporta el 34%

En este caso, se obtuvo que el volumen del frente de duna representa, en promedio, el 63% del volumen total de la zona intermareal, con un mínimo entre los perfiles del 49% y el 81%. El mínimo aporte de la duna se obtuvo en el año 2023 (54% en promedio entre todos los perfiles) y el máximo en 2021 (73%).

Por su parte, la playa aporta un 10% en promedio, con un máximo de 19% y mínimo de 3%. El año con más aporte fue el 2023 y el de menos aporte, el 2021. En comparación con los valores obtenidos para dunas en equilibrio (21%), se obtuvo un valor dos veces mayor.

Finalmente, en cuanto al volumen de reserva, el mismo se encuentra entre 16% y 32% (27% en promedio), siendo el 2023 el año de mayor aporte (30%) y el 2021 el año de menor aporte (23%). Este valor se aproxima al definido por Almeida para sistemas en equilibrio (34%)



Ilustración 103: Evolución temporal de la distribución volumétrica. Fuente: Elaboración propia.

Relación del ancho de dunas con el ancho total

Para sistemas en equilibrio, se obtuvo que el ancho de la duna frontal representa aproximadamente el 50% del ancho total de la zona intermareal. Para los perfiles analizados a lo largo de los 4 años de levantamientos disponibles, en promedio, el ancho de la duna representa el 60% del ancho de la zona intermareal (mínimo de 48% y máximo de 78%). Por su parte, el año 2023 fue el año de menor ancho dunar (46% del ancho total) en contraste con el año 2021 (76%).

7.3 Conclusiones respecto a la evolución del frente dunar

Se ha realizado un análisis de la evolución del frente dunar, con base en imágenes históricas y también con base en levantamientos topográficos. En el primer caso, se midió el avance / retroceso de la línea de frente dunar digitalizada en base a ortofotos. Se tomaron de referencia 22 transectos distribuidos, con información a lo largo de 67 años (1957-2024). En segundo lugar, se han tomado los levantamientos topográficos para medir distintos parámetros morfométricos de la duna entre 2021 y 2024.

El análisis evidencia un gradiente espacial de erosión con máxima intensidad en los primeros transectos, que disminuye progresivamente hacia una zona de transición morfológica y culmina en un sector de potencial acreción (contigua al espigón). Los procesos de retroceso más severos se concentran en los transectos 3, 14 y 15. La zona de transición (transectos 17-21) presenta condiciones de relativa estabilidad, mientras que el sector final muestra indicios de avance, aunque con limitada significancia estadística, que se justifica por la presencia del espigón.

Principales hallazgos:

- Los transectos 3, 14 y 15 presentan las mayores tasas de retroceso (-1.42 a -1.94 m/año), con retrocesos netos acumulados superiores a 83 metros y alta significancia estadística ($p\text{-values} < 1 \times 10^{-6}$).
- Los primeros 16 transectos muestran tendencias erosivas sistemáticas (-0.33 a -1.93 m/año), mientras que los transectos finales (17-22) presentan transición hacia la estabilidad morfológica, con el transecto 22 mostrando la única tendencia progradacional (+0.103 m/año).
- Zona de influencia del espigón: El sector oriental presenta menor retroceso debido a la rotación de playa producto de la construcción del espigón, con algunos transectos sin cambios estadísticamente significativos.
- Variabilidad morfológica: Los sectores más erosionados presentan valores elevados de Envolverte de Cambio (SCE > 115 m), indicando alta variabilidad morfológica histórica.

El análisis de las relaciones alométricas del cordón dunar frontal revela un sistema con tendencia a la estabilización, con parámetros morfométricos próximos al equilibrio teórico (tomando de referencia dunas cercanas consideradas en equilibrio), aunque con algunas desviaciones significativas.

Principales hallazgos:

- Estado de equilibrio relativo: Los volúmenes dunares medidos (promedio 312 m³/m en 2024) se aproximan a los valores de equilibrio teórico (348.72 m³/m) calculados según las relaciones alométricas para $TWL_{10y} = 4.53$ m.
- Estabilización temporal: Desde 2021 se observa una tendencia a la estabilización de los volúmenes dunares, con fluctuaciones menores entre 256-330 m³/m/año, indicando recuperación tras perturbaciones anteriores (temporales de los años 2010 y 2014).
- Posición del pie de duna: Las cotas actuales del pie de duna se sitúan mayoritariamente por debajo del nivel de equilibrio teórico (7.02 m),



sugiriendo potencial de migración hacia cotas superiores entre 0.5-2.0 metros.

- Potencial eólico: El potencial de deriva eólica calculado ($4.033 \text{ m}^3/\text{m}/\text{año}$) es superior al de playas de referencia ($3.06 \text{ m}^3/\text{m}/\text{año}$ en Bayas), indicando condiciones favorables para el desarrollo dunar.
- Variabilidad espacial: Los sectores orientales presentan mayor anchura dunar y estabilidad, mientras que las zonas próximas al área urbana muestran cordones más estrechos y mayor vulnerabilidad.

8. DISCUSIÓN

8.1 Sobre el impacto de los dragados en la estabilidad de la playa

En la Ilustración 104 y la Ilustración 105 pueden observarse representados los puntos correspondientes a los balances sedimentarios para playa completa y playa seca respectivamente, junto con la evolución histórica de los volúmenes de dragado. Puede observarse en ambos casos, que los balances sedimentarios presentan una variabilidad temporal independiente, con valores tanto positivos (acumulación) como negativos (déficit), sin mostrar una correlación evidente con los volúmenes dragados. Los períodos alternantes de déficit y acumulación sedimentaria no coinciden temporalmente con los picos de dragado, ni con un tiempo de desfase detectable entre eventos.

Los años con pérdidas sedimentarias de la playa seca significativas (como 2008-2009, 2013-2014, y 2023-2024) no necesariamente corresponden con períodos de intensa actividad de dragado.

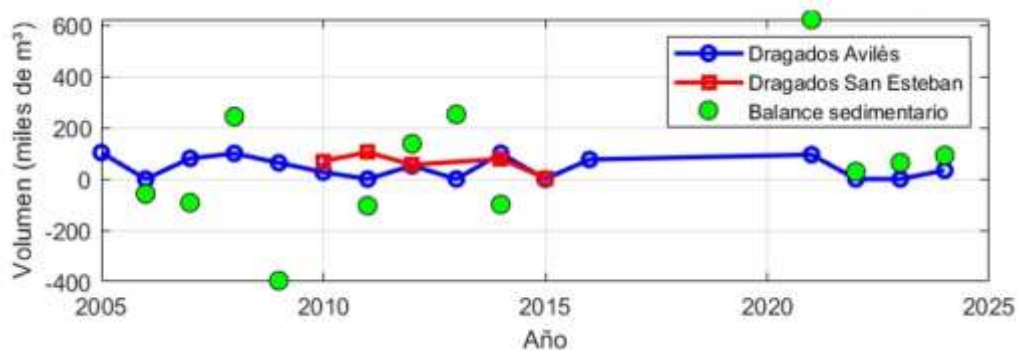


Ilustración 104: Relación entre los volúmenes de dragado y los resultados del balance sedimentario para la playa completa

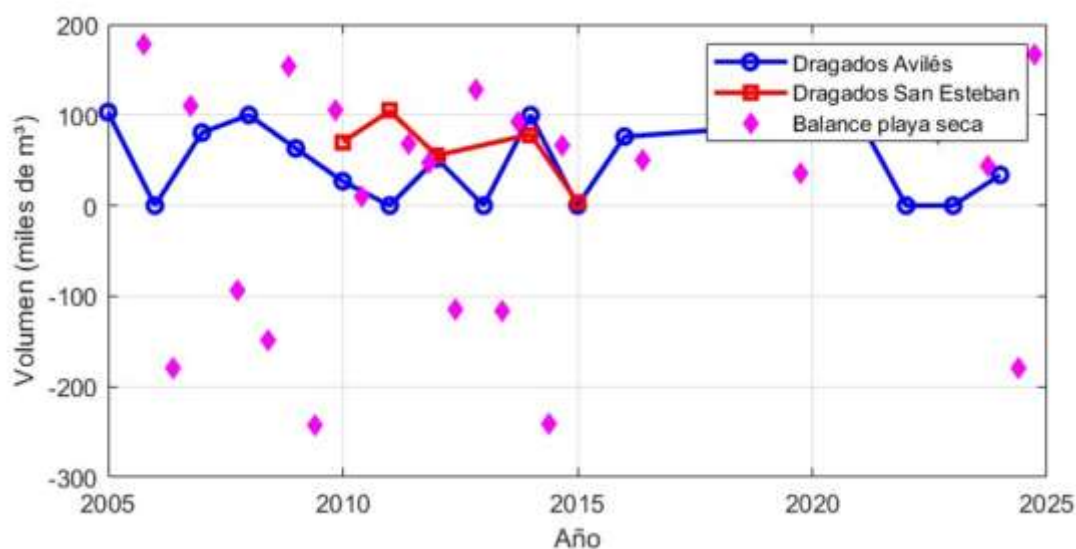


Ilustración 105: Relación entre los volúmenes de dragado y los resultados del balance sedimentario para la playa seca

8.2 Sobre el balance sedimentario y la pérdida de arena del sistema

La Ilustración 106 y la Ilustración 107 resumen los resultados del balance sedimentario de la playa completa y playa seca respectivamente, que se observan en la Tabla 13 y Tabla 15 respectivamente. Puede observarse como ambos subsistemas, pertenecientes al sistema playa-dunas, algunos años acumulan sedimentos y otros los pierden. En particular, el balance total de la playa completa resulta positivo para el período 2021-2024. Cabe mencionar que, por la discontinuidad en los datos disponibles, el pico en el año 2021 representa la acumulación del período 2014-2021, por lo cual no es comparable con el resto de los valores. De todas maneras, a partir del período 2021-2022, se observa una tendencia del sistema a captar sedimentos.

En cuanto a la playa seca (Ilustración 107), notar que los periodos representados no son anuales, dado que se corresponden con los levantamientos disponibles volcados en la Tabla 15. En este caso, para el mismo período (2021-2024) se observa una tendencia a acumular arena, a excepción del período septiembre 2023- mayo 2024, en el cual se tiene un pico de déficit, pero que alcanza a recuperar entre los meses de mayo 2024 a septiembre 2024, aunque quedando un déficit de 12.408 m³. Así, los datos muestran una alternancia sistemática entre períodos de acumulación y déficit y puede observarse como, tras cada episodio de pérdida, el sistema muestra capacidad de recuperación natural, como la recuperación posterior al gran déficit de 2009. Esto es independiente de la ejecución de los dragados, como se mencionó anteriormente. En efecto, en el período 2022-2023 no se ejecutaron dragados, el último realizado a la fecha de este estudio fue el de mayo de 2024.

ESTUDIO DE EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DE PLAYAS EN AVILÉS

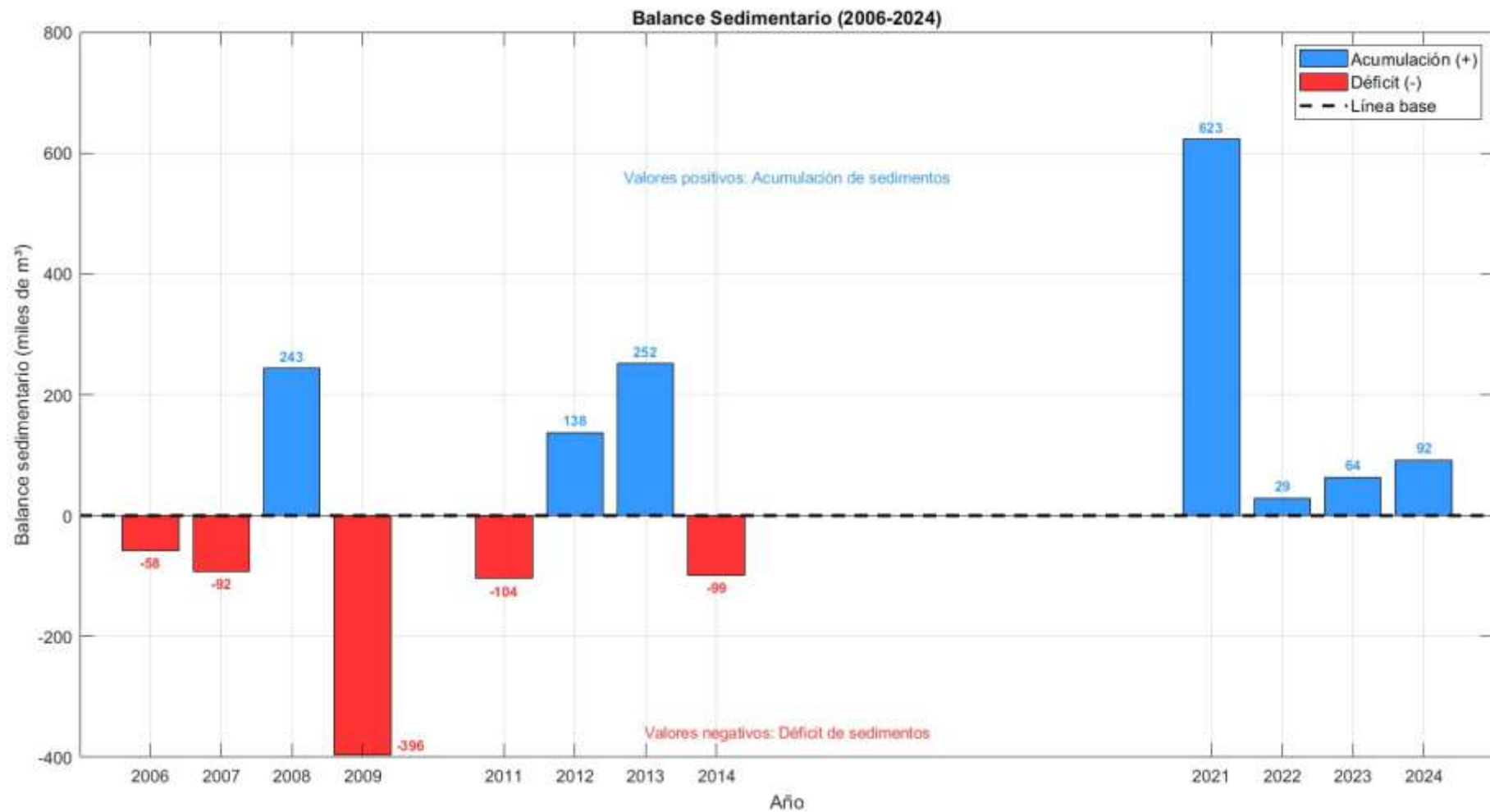


Ilustración 106: Balance sedimentario de la playa completa. Fuente: Elaboración propia

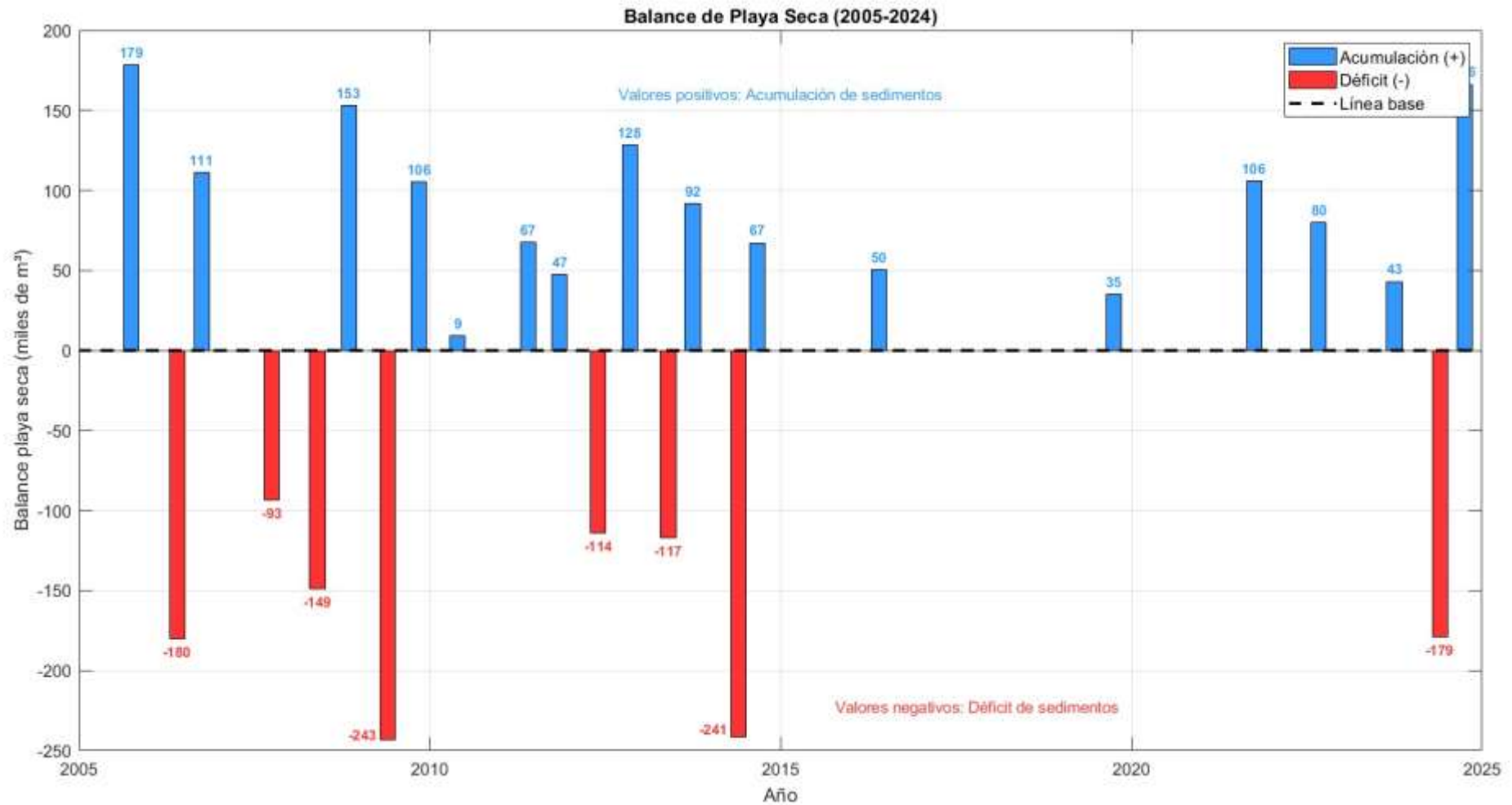


Ilustración 107: Balance sedimentario de playa seca. Fuente: Elaboración propia

8.3 Sobre la evolución del frente dunar

La Ilustración 108, Ilustración 109 e Ilustración 110 representan la variación de la cota del pie de duna, volumen de reserva, volumen de playa, volumen de duna, ancho y altura de duna en los tres períodos analizados. El aumento generalizado de la cota del pie de duna en el primer período indicaría que al ubicarse el pie en cotas más altas, el frente dunar retrocedió, lo cual coincide con la evolución del frente dunar mediante imágenes históricas de los perfiles 1 a 16, pero no con los del 16 al 22 en los que se detectó un avance del pie de duna. El aumento del volumen de playa, es consistente con el aumento del volumen de playa seca resultante del balance sedimentario, aunque el área considerada en uno y otro caso no coincida completamente.

Por su parte, en el período 2022-2023 se observa igualmente una variación positiva de la cota del pie de duna, mientras que la mayoría de los perfiles redujo el volumen dunar, siguiendo la tendencia del primer periodo de análisis. Al igual que para el periodo 2021-2022 el volumen total de playa seca calculado en el balance sedimentario coincide con la tendencia de la mayoría de los perfiles para el volumen de playa (ver Tabla 15).

Finalmente, en la Ilustración 110 se incluyen los resultados para el período 2023-2024, en el cual se detectó un aumento en la altura de los perfiles de la duna y en su ancho, a diferencia de los períodos anteriores. Otra diferencia que se observa en este periodo es la disminución del volumen de playa, que acompaña la tendencia calculada en el balance sedimentario. Por otro lado, la variación negativa de las cotas de pie de duna en la mayoría de los perfiles indica que hubo un avance del mismo, ubicándose en cotas inferiores, especialmente en los perfiles ubicados hacia el oriente, lo cual también acompaña los resultados de la evolución del frente dunar mediante imágenes históricas.

En cuanto al volumen de la duna, se observa una transición desde el primer período (con un déficit de $-50 \text{ m}^3/\text{m}$), hasta el tercer período donde se observa una acumulación en el volumen de $150 \text{ m}^3/\text{m}$, este tercer período coincidiendo con la ejecución del último dragado, nuevamente apuntalando la teoría de la independencia de la ejecución de los dragados con los balances sedimentarios.

Variaciones Morfológicas 2021-2022 (22 Perfiles)

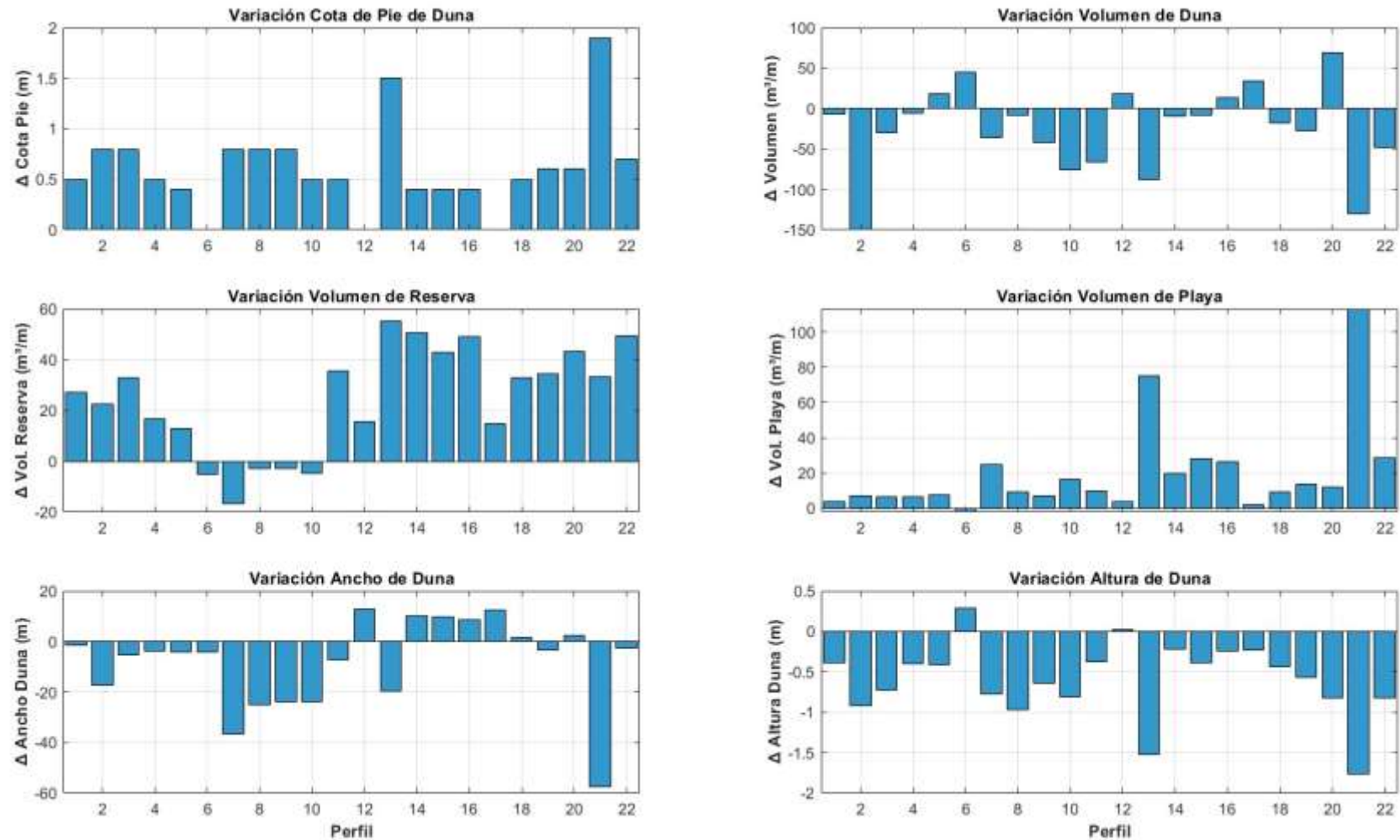


Ilustración 108: Variación de parámetros físicos de la duna. Período 2021-2022

Variaciones Morfológicas 2022-2023 (22 Perfiles)

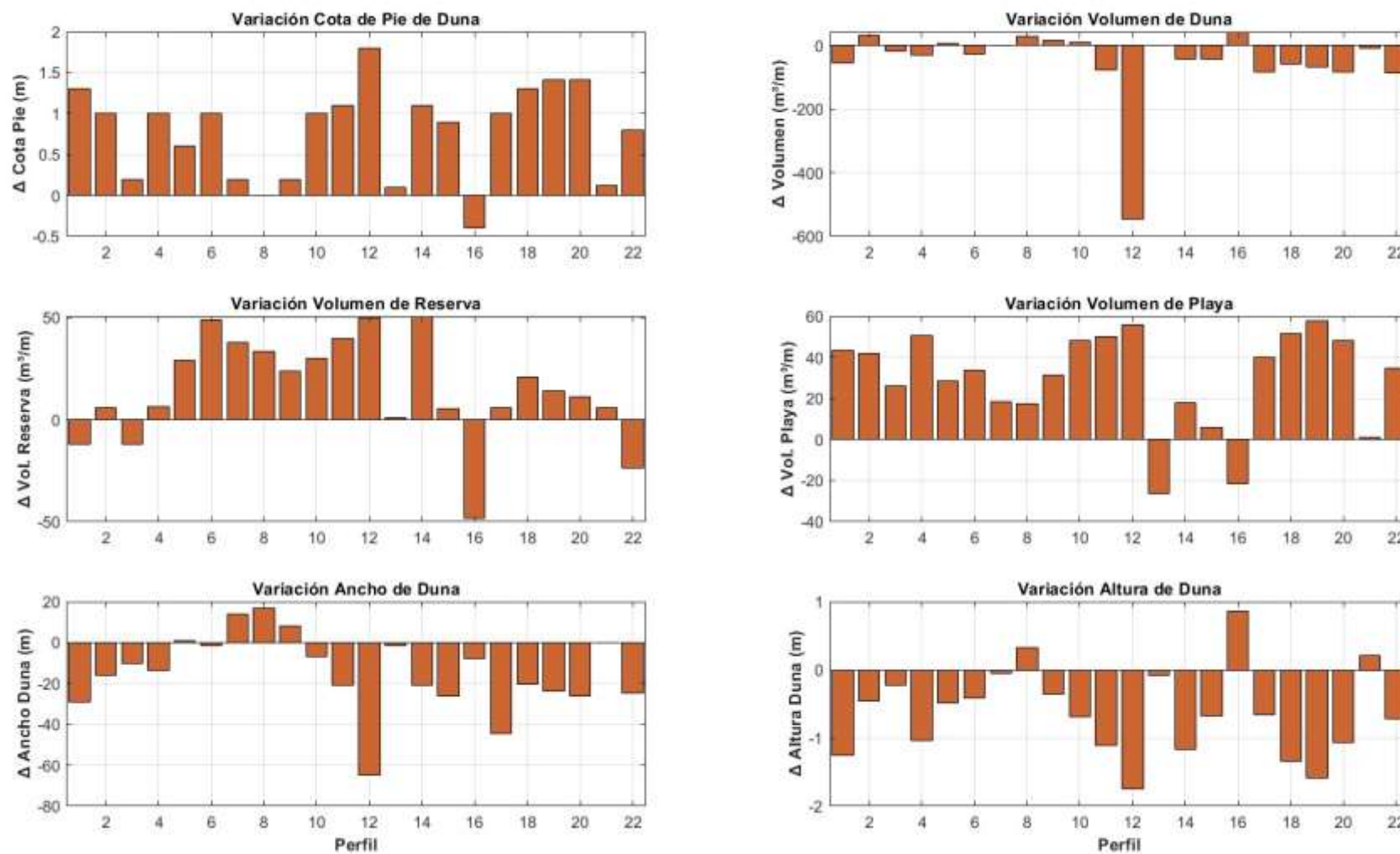


Ilustración 109: Variación de parámetros físicos de la duna. Período 2022-2023

Variaciones Morfológicas 2023-2024 (22 Perfiles)

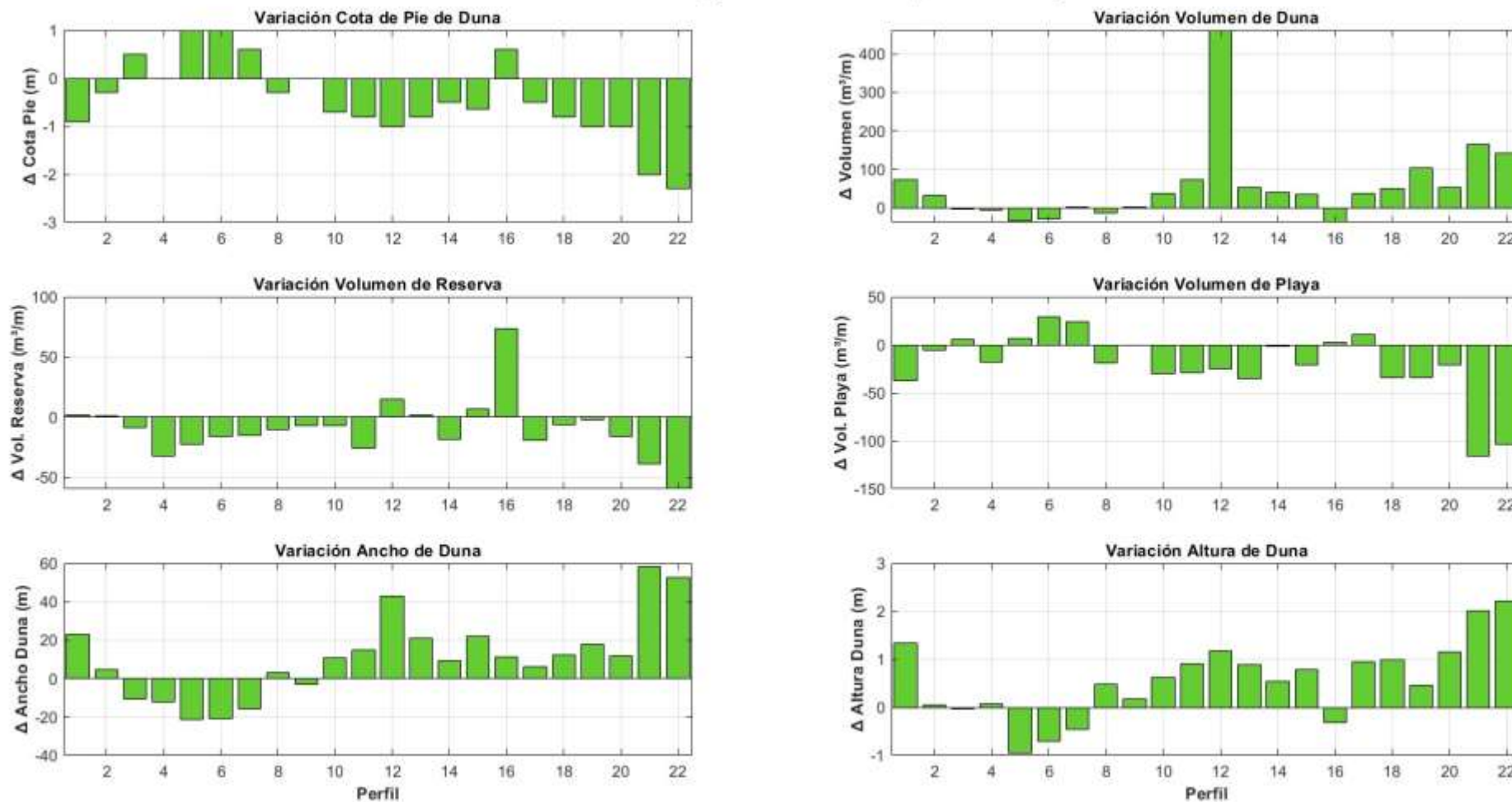


Ilustración 110: Variación de parámetros físicos de la duna. Período 2023-2024

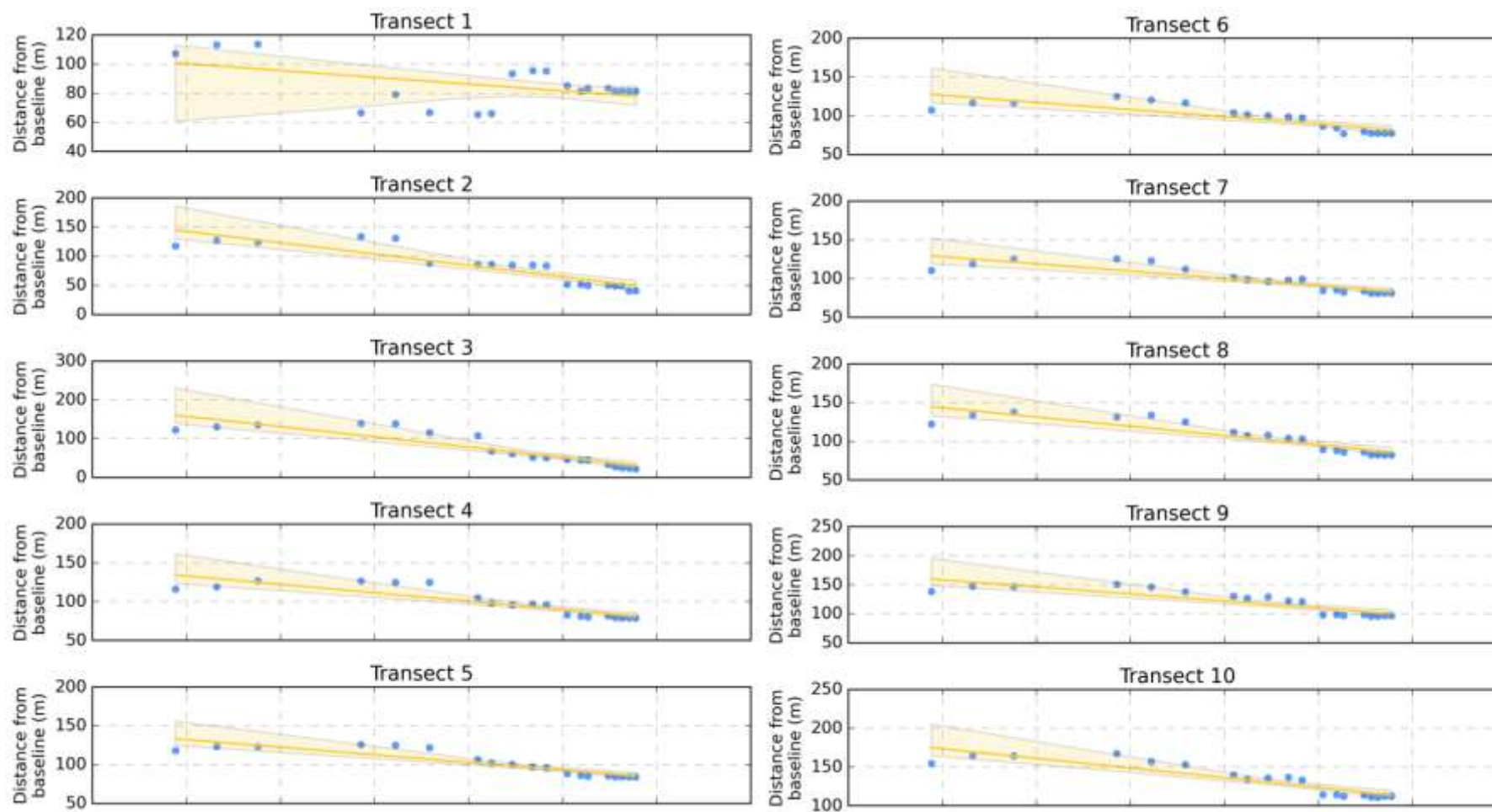


Ilustración 111: Tendencia de evolución de la línea de costa – perfiles 1 a 10 (eje x: años)

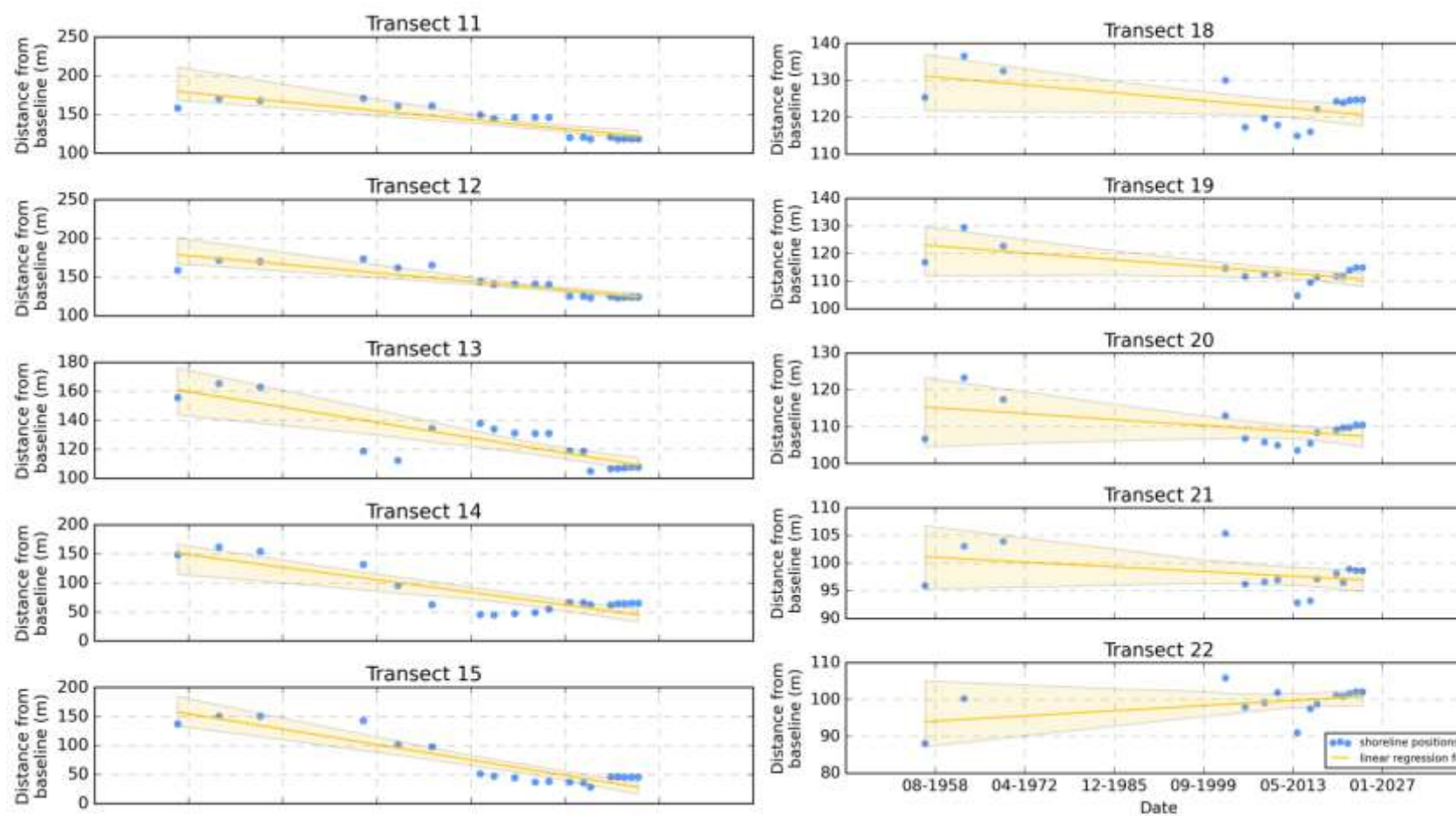


Ilustración 112: Tendencia de evolución de la línea de costa – perfiles 11 a 15 y 18 a 22 (eje x: años)

8.4 Sobre el modelo de funcionamiento del sistema

Según las estimaciones del presente estudio, el balance global respecto a 2005 muestra una acumulación de arena de unos 926 751 m³, concentrada principalmente en el perfil sumergido entre -3 y -13 m en la parte central de la playa.

Esta acumulación está condicionada por los cambios de la playa durante los años sin información completa (P09: ago-2014 a sep-2021), cuando el balance global fue claramente superior al histórico (~625 000 m³).

Dado que no se ha efectuado ninguna regeneración desde enero de 2005, la acumulación en el perfil sumergido constituye una clara evidencia de que la zona de estudio funciona como un sistema abierto (IHCantabria, 2021).

En el periodo septiembre 2023-septiembre 2024 (PT08), la acumulación (92 000 m³) es un 33 % inferior a la mínima histórica (P06) pero un 44 % superior a la anualidad anterior P11 (63 798 m³).

Por tanto, parece continuar la tendencia de acumulación observada en el informe anterior (IHCantabria, 2024), a pesar del dragado de 2021, lo que refuerza la hipótesis de sistema abierto.

9. CONCLUSIONES GENERALES

A lo largo del análisis sobre el sistema de playas-dunas en Avilés, se ha evidenciado una evolución compleja y dinámica que no puede explicarse únicamente por la actividad humana como los dragados, dado que los datos muestran que los balances sedimentarios han fluctuado con independencia de estas intervenciones.

En los últimos años, especialmente a partir de 2021, se ha observado una tendencia de la playa entera (entendiéndose como tal el área definida en la Ilustración 56) hacia la acumulación de sedimentos. El balance sedimentario resultó positivo en los tres periodos analizados (92.003 m³ en el último año 2023-2024), habiéndose realizado obras de dragado en dos de los tres periodos. Por otra parte, el balance 2005-2024 también arroja un balance positivo por un valor de 926.751 m³. Esto evidencia la capacidad del sistema para mantener su stock sedimentario a través de aportes externos, confirmando su naturaleza de sistema abierto.

El retroceso sistemático del frente dunar en los sectores centrales contrasta aparentemente con el balance sedimentario positivo general, lo que indica una redistribución espacial compleja del sedimento desde la zona intermareal hacia el perfil sumergido. En particular, el periodo más reciente destaca por un crecimiento en la altura y el ancho de las dunas. Este comportamiento refuerza la idea de que el sistema funciona como un sistema abierto, capaz de captar sedimentos desde zonas externas.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Arens, S.M., 1996b. Rates of aeolian transport on a beach in a temperate humid climate. *Geomorphology* 17, 3–18. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00089-N](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00089-N).
- Bagnold, R.A., 1941. The physics of blown sand and desert dunes. *Nature* 148, 480–481.
- Bellido Prieto, G. (2023). *Estudio del efecto de la prolongación del dique de la ría de Avilés en la estabilidad de la playa* (Trabajo de Fin de Máster en Costas y Puertos, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria).
- Camus, P., Méndez, F. J., & Medina, R. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate in coastal areas. *Coastal Engineering*, 58, 851–862. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). (1994). *Estudio del dique de contención de arenas en la margen izquierda de la Ría de Avilés (Asturias)* (Informe único y final). CEDEX.
- CEDEX. (2010). *Análisis de la playa de Salinas (Castrillón-Asturias) y posibles mejoras de su comportamiento*. CEDEX.
- CEDEX. (2012). *Seguimiento morfodinámico de playas: Seguimiento de la Playa de Salinas y bocana del Puerto de Avilés. Fase 2011* (Informe final, tomo único). CEDEX.
- CEDEX. (2013). *Seguimiento de la evolución morfodinámica de la Playa de Salinas y bocana del Puerto de Avilés. Fase 2012* (Informe final único y definitivo). CEDEX.
- CEDEX. (2014). *Seguimiento de la evolución morfodinámica de la Playa de Salinas y bocana del Puerto de Avilés. Fase 2013* (Informe final, tomo único). CEDEX.
- CEDEX. (2015). *Seguimiento morfodinámico de playas: Seguimiento de la Playa de Salinas. Fase 2014* (Informe final, tomo único). CEDEX.
- CEDEX. (2017). *Seguimiento morfodinámico de playas: Seguimiento de la Playa de Salinas. Fase 2014-2016* (Informe final, tomo único). CEDEX.
- de Almeida, L. R., González, M., & Medina, R. (2019). Morphometric characterization of foredunes along the coast of northern Spain. *Geomorphology*, 338, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.019>
- Diego Cavada, J. M. (2014, 5 junio). *Sedimentología, morfología y evolución del campo dunar de Bayas (Asturias)* (Trabajo de Fin de Máster, Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica). Universidad de Oviedo. <https://hdl.handle.net/10651/27565>
- Flor, G., Flor-Blanco, G., (2009a). Aspectos morfológicos, dinámicos y sedimentarios del sector costero : desembocadura del Nalón-playa de Bañugues : problemática

ambiental, 6o Simposio sobre el margen Ibérico Atlántico. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. España, Oviedo.

Flor, G., & Flor Blanco, G. (2009b). Aspectos morfo-sedimentarios y ambientales del sector costero de la desembocadura del río Nalón: playas de Los Quebrantos, Bayas, Salinas-El Espartal, Xagó y el conjunto Aguilera-Carniciega-Verdicio. *Trabajos de Geología*, 29, 27–43

Flor-Blanco, G., Flor, G., (2011). Alteraciones antrópicas por dragados en el estuario de Avilés y la playa/dunas de “Salinas-El Espartal” (Asturias), in: Actas de Las VI Jornadas de Geomorfología Litoral, Tarragona.

Flor-Blanco, G., Flor, G., Pando, L., (2013). Evolution of the Salinas-El Espartal and Xagó beach/dune systems in north-western Spain over recent decades: Evidence for responses to natural processes and anthropogenic interventions. *Geo-Marine Lett.* 33, 143–157. <https://doi.org/10.1007/s00367-012-0301-3>

Flores Soriano, C. (2015). *Evolución de los campos dunares de Asturias desde mediados del siglo XX hasta 2014* (Trabajo de Fin de Máster, Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica, Universidad de Oviedo). Recuperado de <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/33787>

Gallego, A., Pellón, E., & Gomes da Silva, P. (2024). SEATool: una toolbox de ArcGIS Pro para el análisis de evolución de líneas de costa. In *Libro de actas: XII Jornadas de Geomorfología Litoral, Valencia, 25-27 de septiembre de 2024*. <https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18659>

Hsu, S. A. (1986). Correction of land-based wind data for offshore applications: A further evaluation. *Journal of Physical Oceanography*, 16(3), 390–394.

Hsu, S. A., & Weggel, J. R. (2002). Wind-blown sediment transport. *Coastal Engineering Manual* (Engineer Manual EM-1110-2-1100, Part III, Chapter 4). U.S. Army Corps of Engineers.

IHCantabria, (1996a). Procesos litorales en la ensenada y ría de Avilés, in: Estudio de La Canal de Navegación Del Puerto de Avilés y Su Interacción Con La Playa Del Espartal.

IHCantabria, (1996b). Propuesta de soluciones, in: Estudio de La Canal de Navegación Del Puerto de Avilés y Su Interacción Con La Playa Del Espartal.

IHCantabria, (2020). Análisis de las muestras de caracterización granulométrica y química de los sedimentos a dragar en el Puerto de Avilés.

IHCantabria. (2021). *Estudio de evolución del sistema playa-dunas para dar respuesta al punto 4.4 de la DIA del proyecto de Dragado de Mantenimiento en el Puerto de Avilés*.

IHCantabria. (2024). *Estudio topobatimétrico de la playa e informe anual de pérdidas y ganancias de sedimento y vegetación dunar: Tareas 2 y 3, período 2021–2022*.

IHCantabria. (2024). *Estudio topobatimétrico de la playa e informe anual de pérdidas y ganancias de sedimento y vegetación dunar: Tareas 2 y 3, período 2022–2023*.

INDUROT, (1999). Aportaciones del INDUROT al proyecto de regeneración medioambiental de la playa de San Juan-Salinas y mejora de la entrada al puerto de Avilés.

INDUROT, (2017). Estudio Geomorfodinámico y de la cubierta vegetal de las dunas de El Espartal en el T.M. de Castrillón, Asturias.

López Peláez, J., & Flor Blanco, G. (2008). *Evolución ambiental del estuario de Avilés (1833–2006)*. Trabajos de Geología, (28), 119–135. <http://hdl.handle.net/10651/46008>

Martínez, M. (2024, 7 de junio). "¿Cómo han afectado a la playa de Salinas los dragados del Puerto de Avilés? Los sorprendentes datos de los últimos estudios" *La Nueva España – Avilés*. <https://www.lne.es/aviles/2024/06/07/han-afectado-playa-salinas-dragados-103455127.html>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2018). Declaración de impacto ambiental favorable del proyecto "Dragado de mantenimiento en el puerto de Avilés para cuatro años". *Boletín Oficial del Estado* (BOE-A-2018-9755), 20 de julio de 2018. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2018-9755

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2025). *Red Natura 2000 en España* [Archivo KMZ]. Banco de Datos de la Naturaleza. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/rednatura_2000_desc.html

Nickling, W.G., Davidson-Arnott, R.G.D., 1990. Aeolian sediment transport on beaches and coastal sand dunes. In: Davidson-Arnott, R.G.D. (Ed.), *Proceedings of Symposium on Coastal Sand Dunes*. National Research Council of Canada, Ottawa, pp. 1–35.

Pellón, E., de Almeida, L. R., González, M., & Medina, R. (2020). Relationship between foredune profile morphology and aeolian and marine dynamics: A conceptual model. *Geomorphology*, 351, 106984. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106984>

Pérez, J., Menéndez, M., & Losada, I. J. (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering*, 124, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.03.005>

Quetzalcóatl, O., González, M., Cánovas, V., Medina, R., Espejo, A., Klein, A., Tessler, M. G., Almeida, L. R., Jaramillo, C., Garnier, R., Kakeh, N., & González-Ondina, J. (2019).



SMC ϵ , a coastal modeling system for assessing beach processes and coastal interventions: Application to the Brazilian coast. *Environmental Modelling & Software*, 116, 131–152. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.03.001>

Radiotelevisión del Principado de Asturias. (2021, 17 de noviembre). *El dragado del puerto de Avilés no es el único causante de la pérdida de arena en Salinas*. https://www.rtpa.es/noticias-asturias:-El-dragado-del-puerto-de-Aviles-no-es-el-unico-causante-de-la-perdida-de-arena-en-Salinas_111637150903.html

Ribas de Almeida, L. (2017). *Análisis morfológico de las dunas primarias costeras y definición de los parámetros controladores de su forma de equilibrio* (Tesis doctoral, Programa de Doctorado en Ciencias y Tecnologías para la Gestión de la Costa, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria).

Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., & Sallenger Jr, A.H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>

Tolman, H. L. (1991). A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Physical Oceanography*, 21, 782–797. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2)

11. ANEXOS

12.1 Oleaje

Temporales

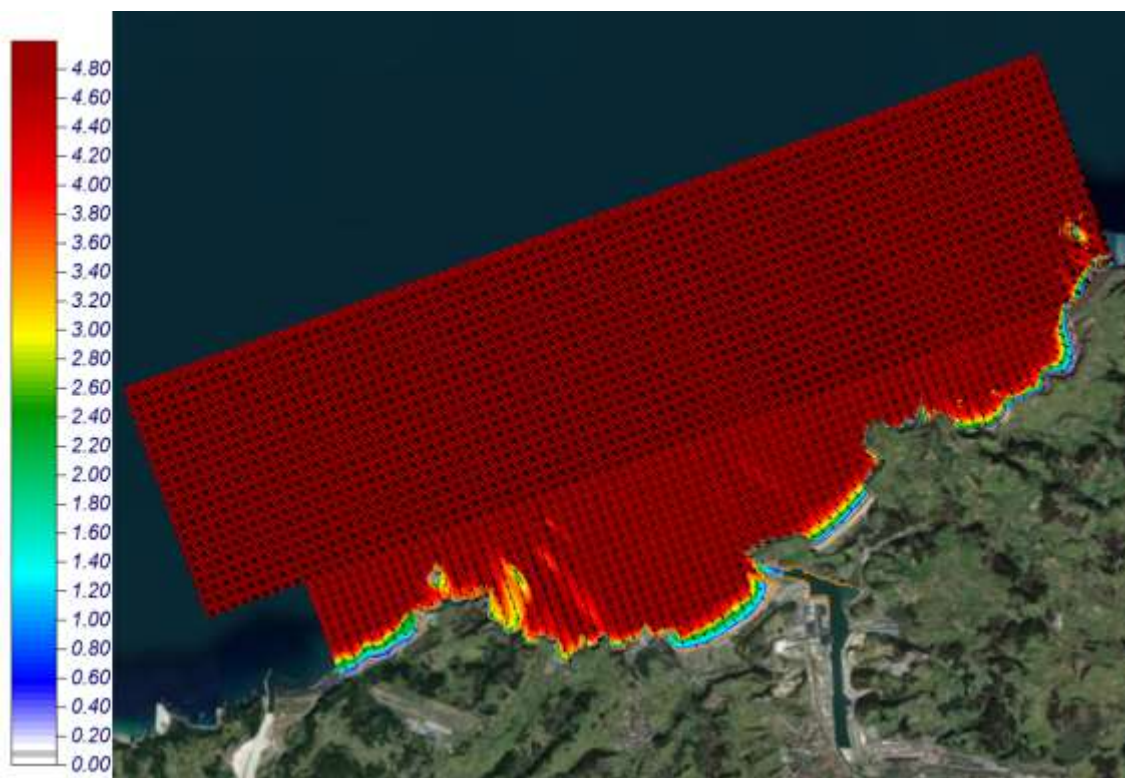


Ilustración 113: Temporal NW, $H_s=5.46\text{m}$. $T_p=17$ segundos. Pleamar

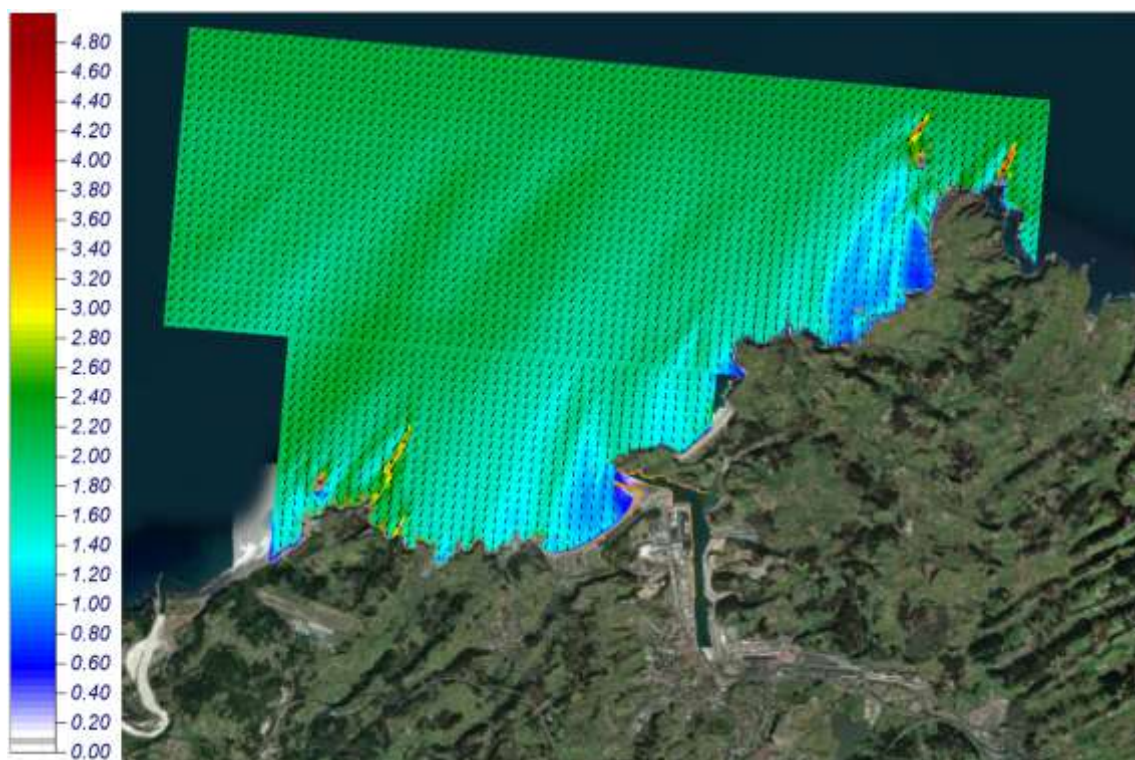


Ilustración 114: Temporal NE, $H_s=2.20\text{m}$. $T_p= 14$ segundos. Pleamar

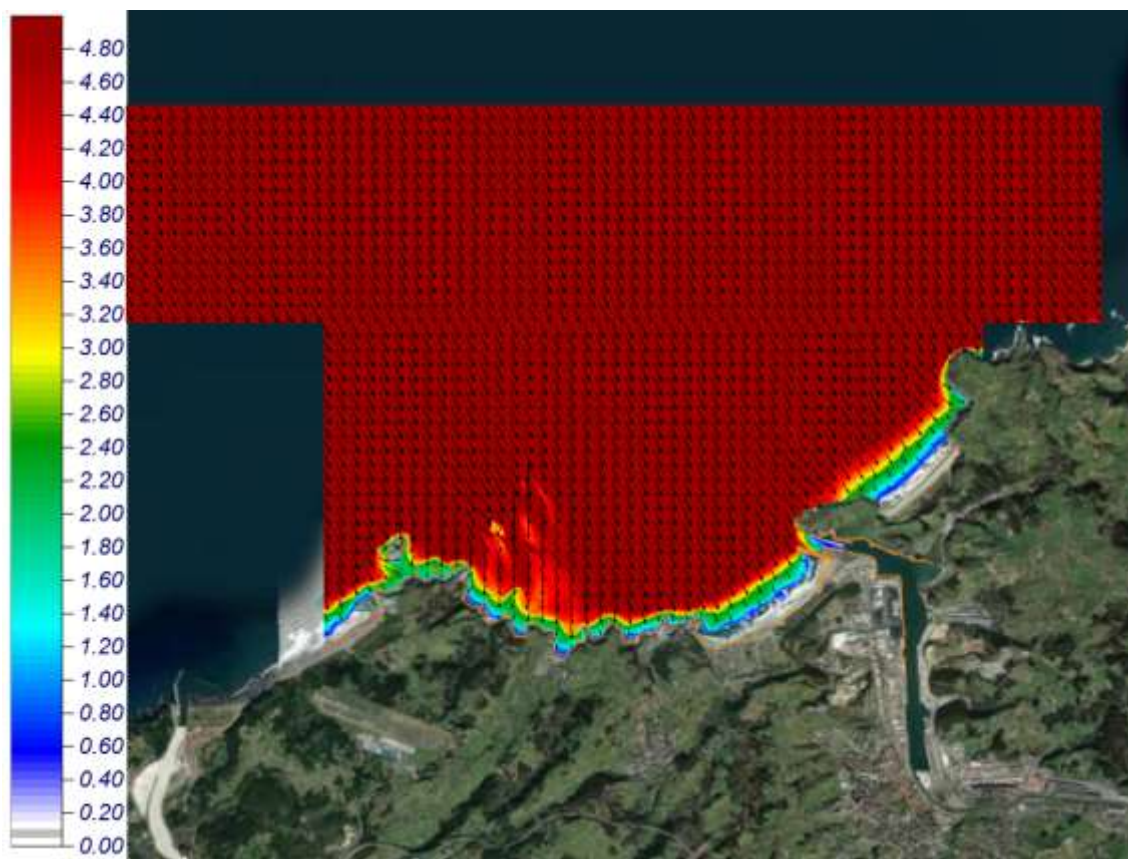


Ilustración 115: Temporal NNW, $H_s=5.72\text{m}$. $T_p= 18$ segundos. Bajamar

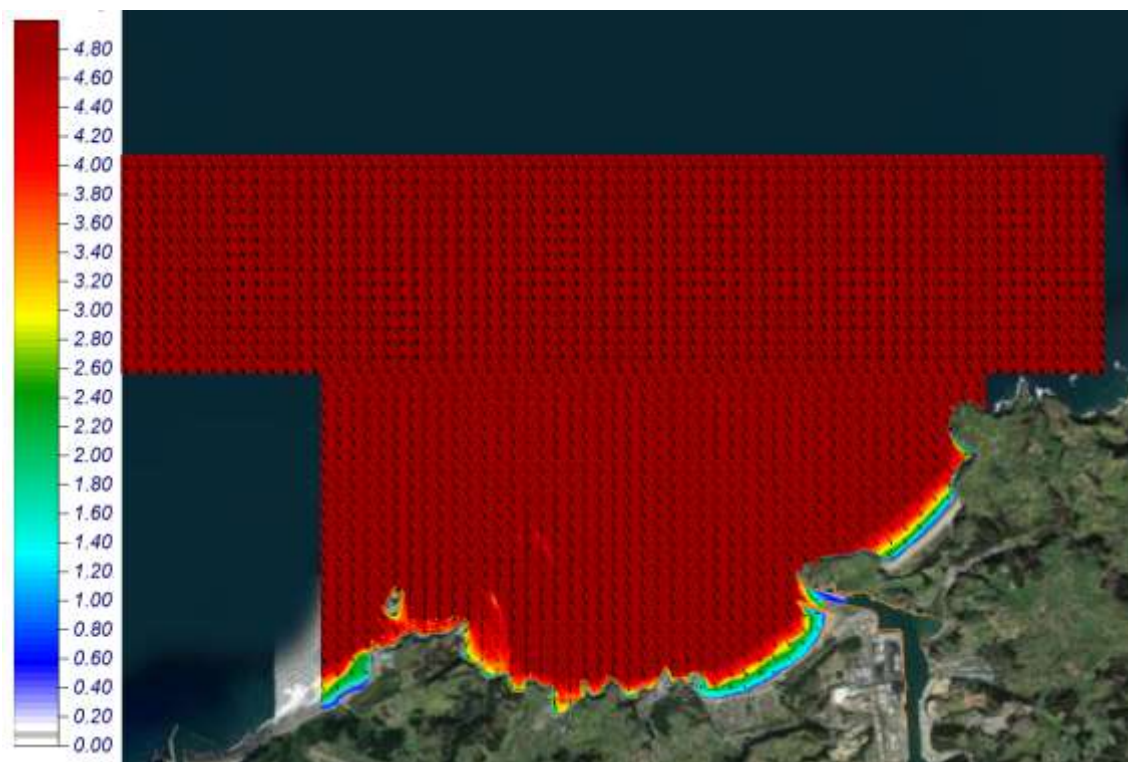


Ilustración 116: Temporal NNW, $H_s=5.72\text{m}$. $T_p= 18$ segundos. Pleamar

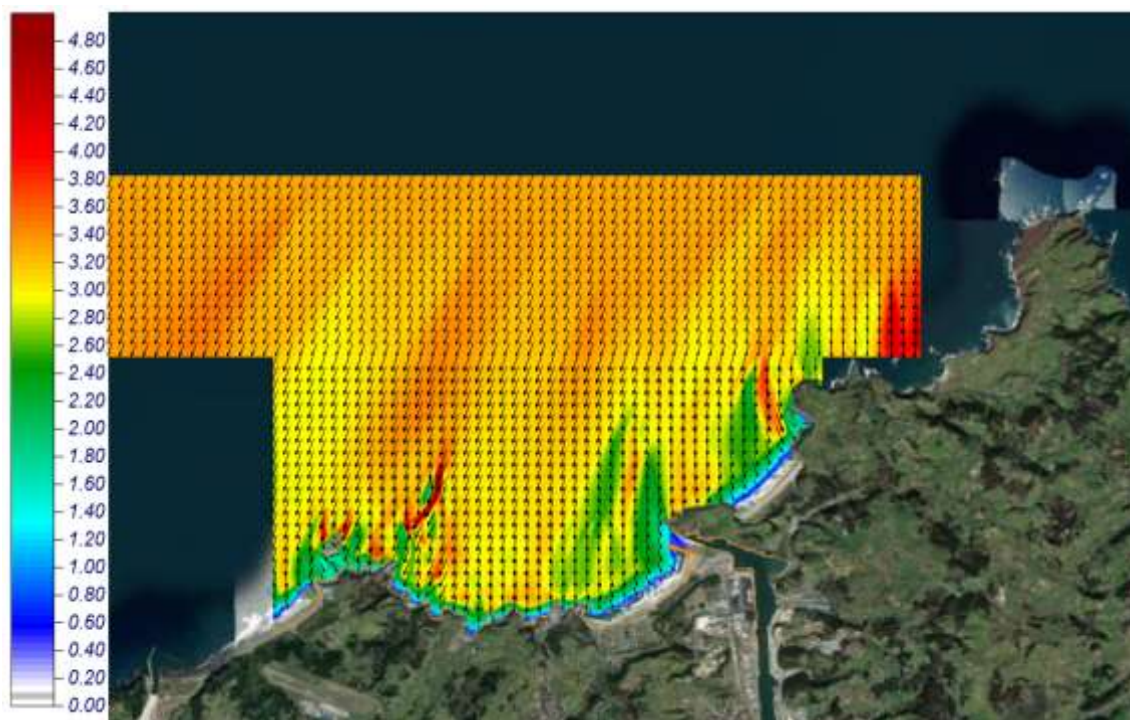


Ilustración 117: Temporal NNE, $H_s=3.33\text{m}$. $T_p=14$ segundos. Bajamar

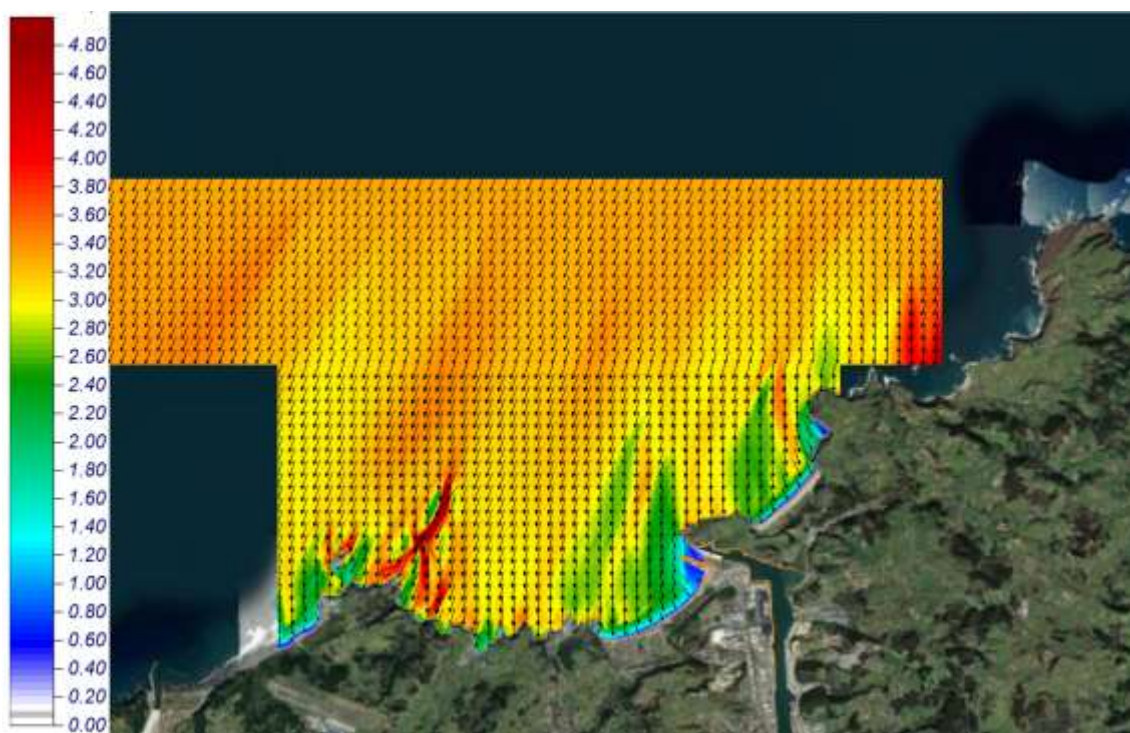


Ilustración 118: Temporal NNE, $H_s=3.33\text{m}$. $T_p=14$ segundos. Pleamar

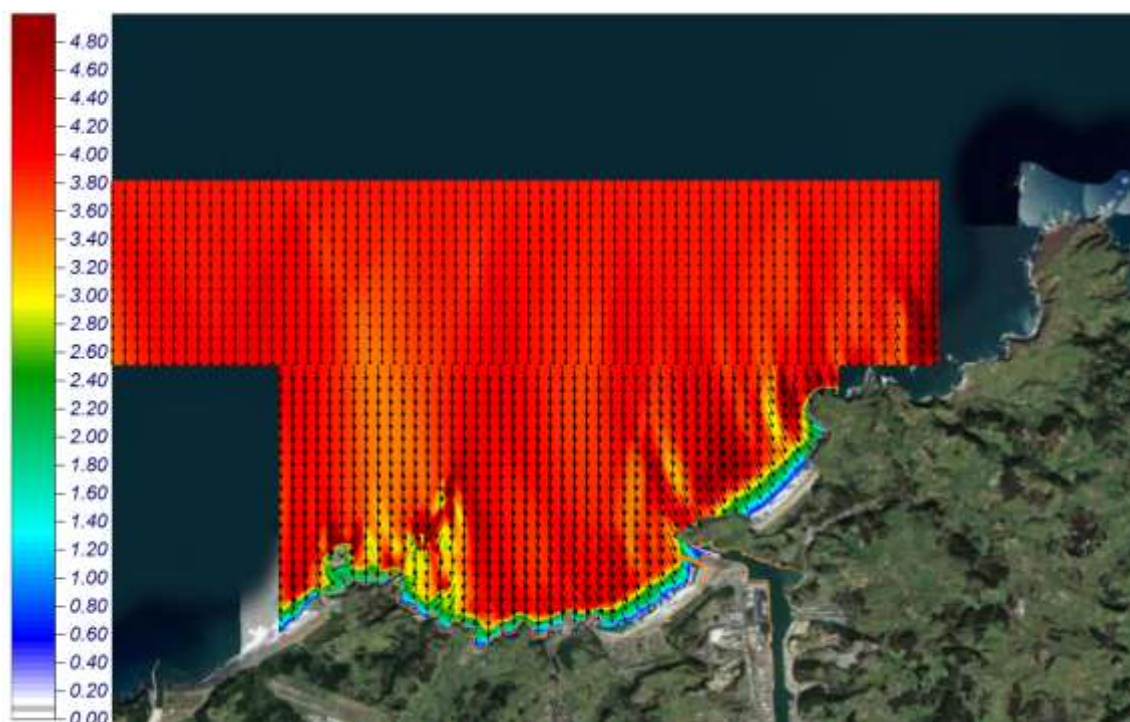


Ilustración 119: Temporal N, $H_s=3.94\text{m}$. $T_p=17$ segundos. Bajamar

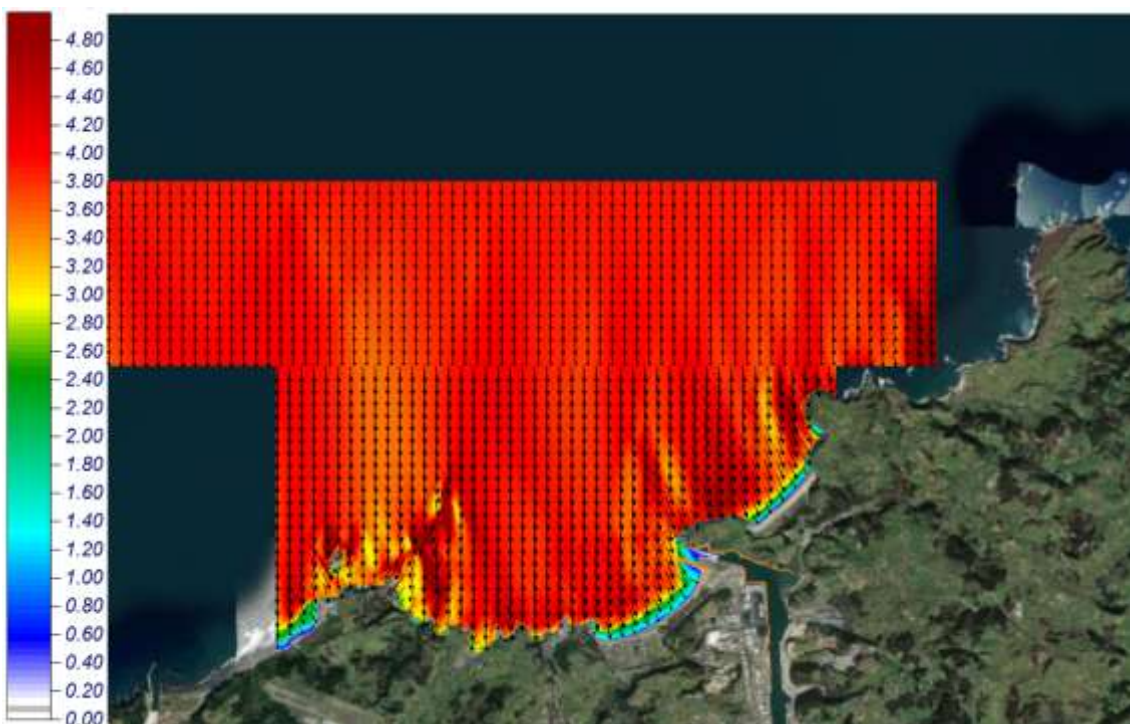


Ilustración 120: Temporal N, $H_s=3.94\text{m}$. $T_p=17$ segundos. Pleamar

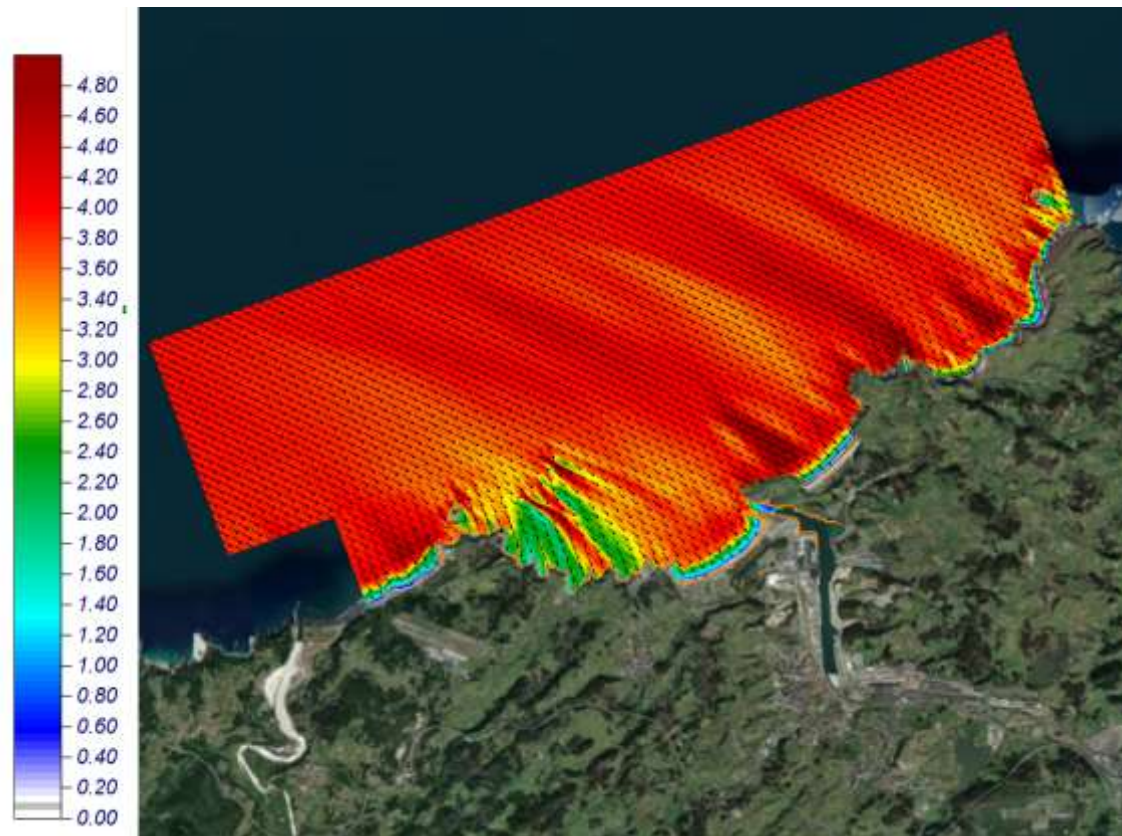


Ilustración 121: Temporal WNW, $H_s=3.98\text{m}$. $T_p=17$ segundos. Pleamar

Condiciones medias

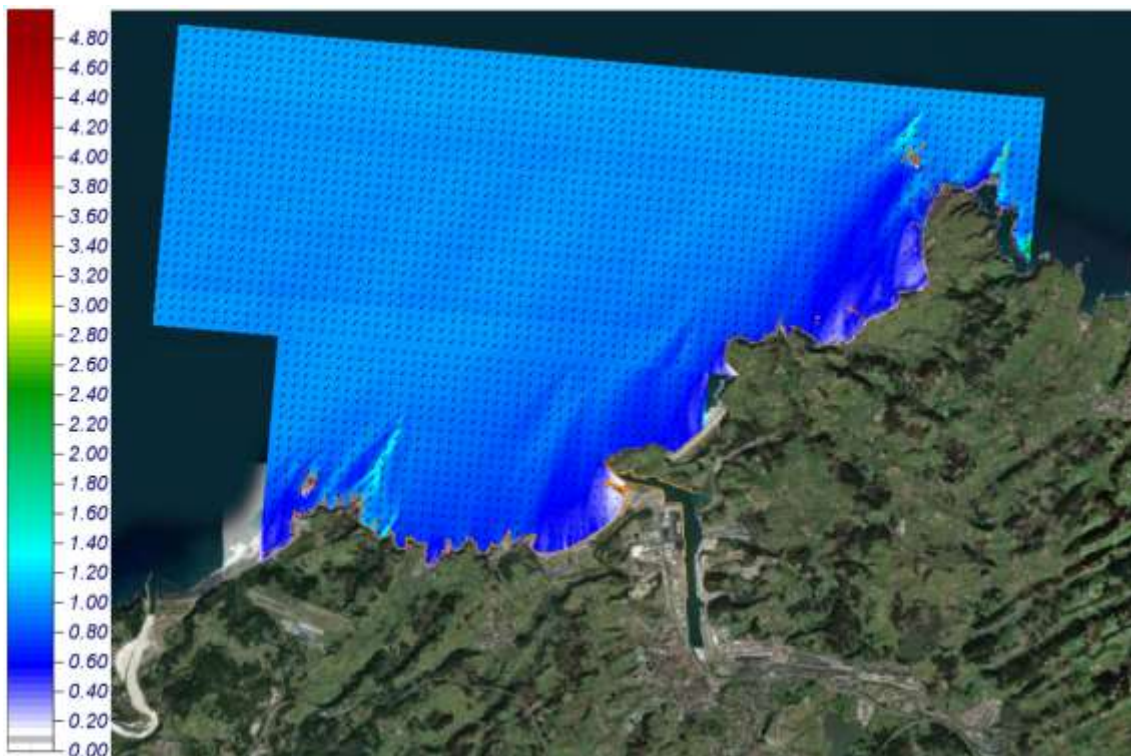


Ilustración 122: Condiciones medias NE, $H_s=1.04\text{m}$. $T_p=10$ segundos. Pleamar

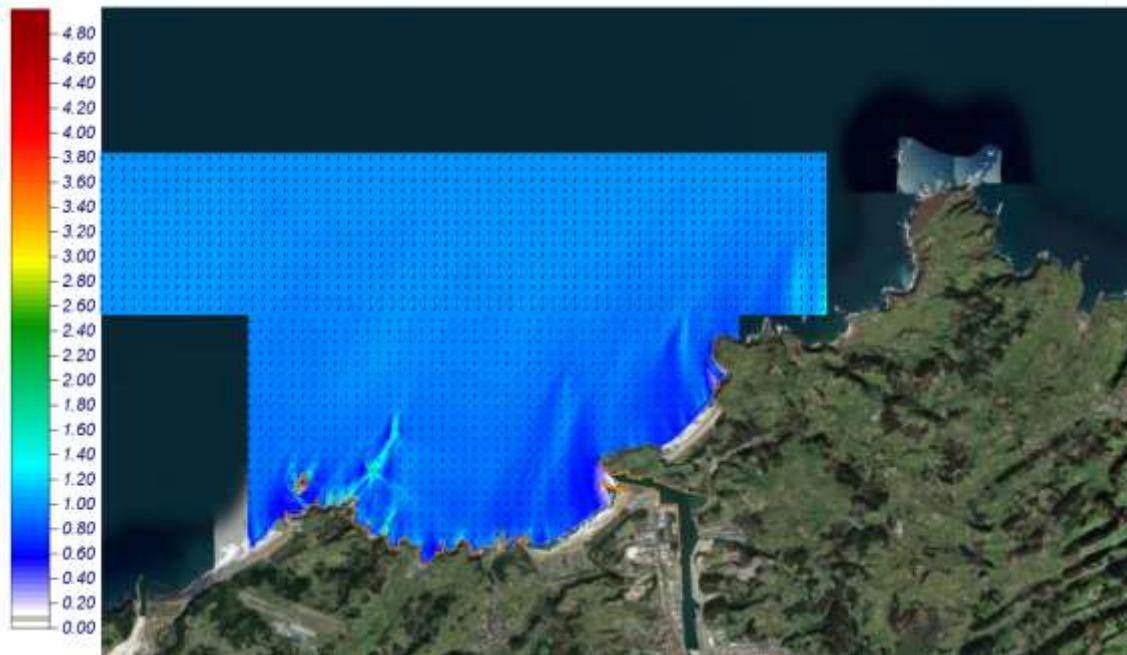


Ilustración 123: Condiciones medias NNE, $H_s=1.0m$. $T_p= 10$ segundos. Bajamar

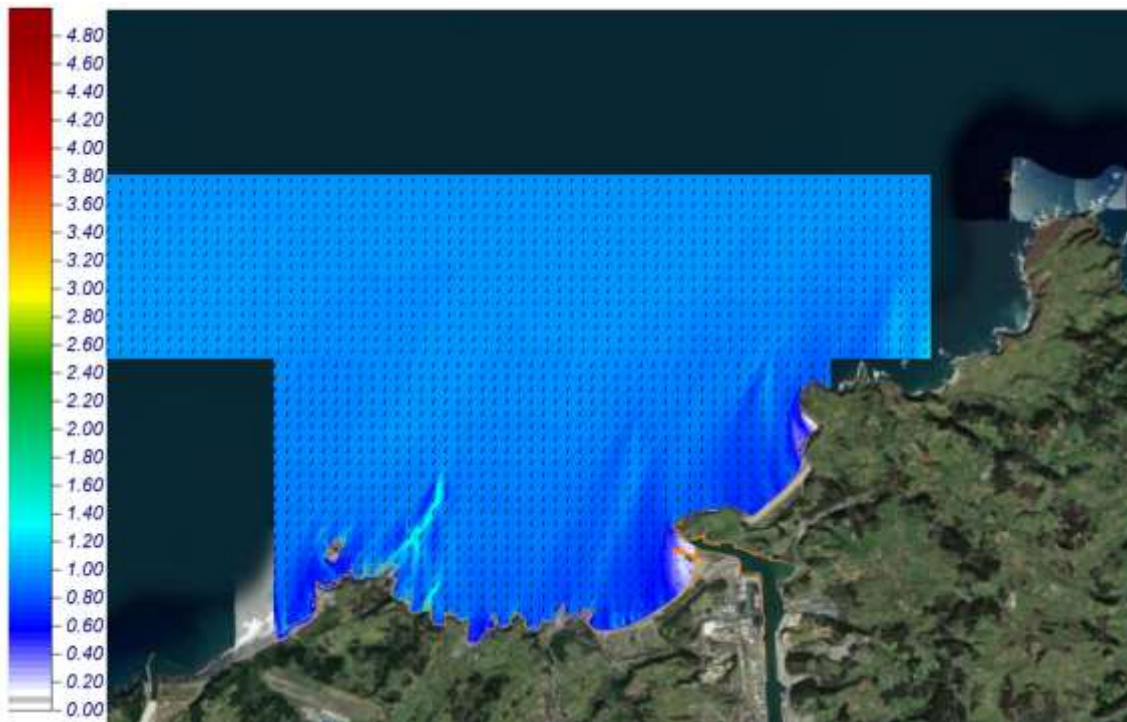


Ilustración 124: Condiciones medias NNE, $H_s=1.0m$. $T_p= 10$ segundos. Pleamar

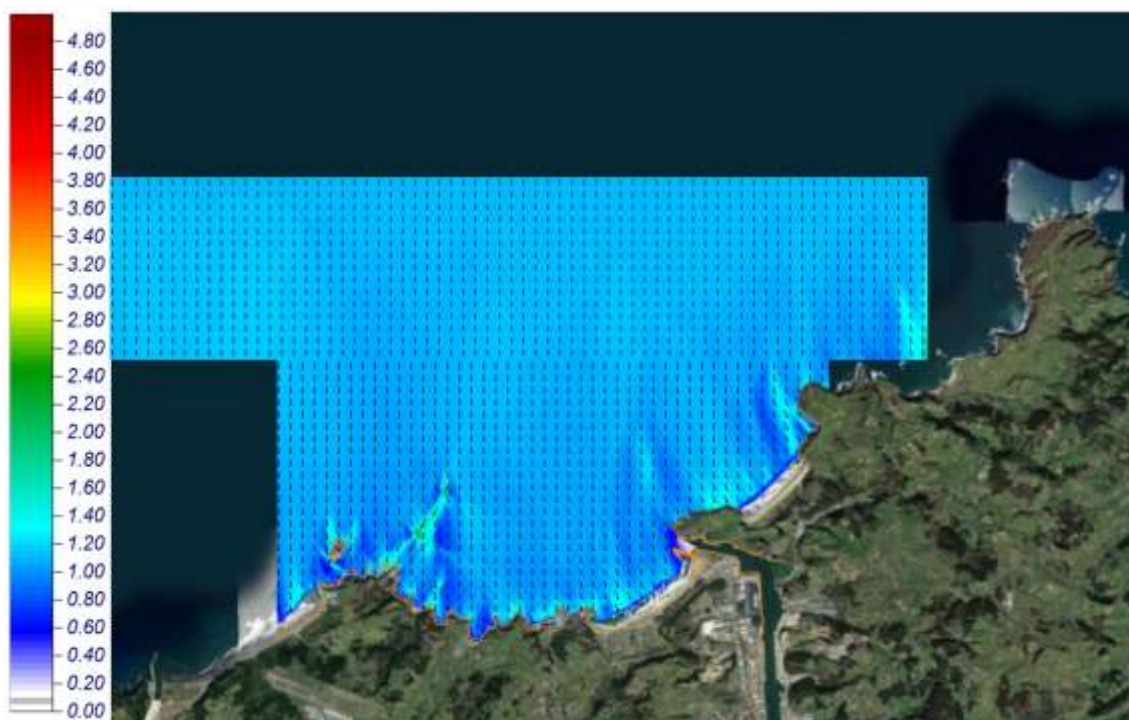


Ilustración 125: Condiciones medias N, $H_s=1.12\text{m}$. $T_p=11$ segundos. Bajamar

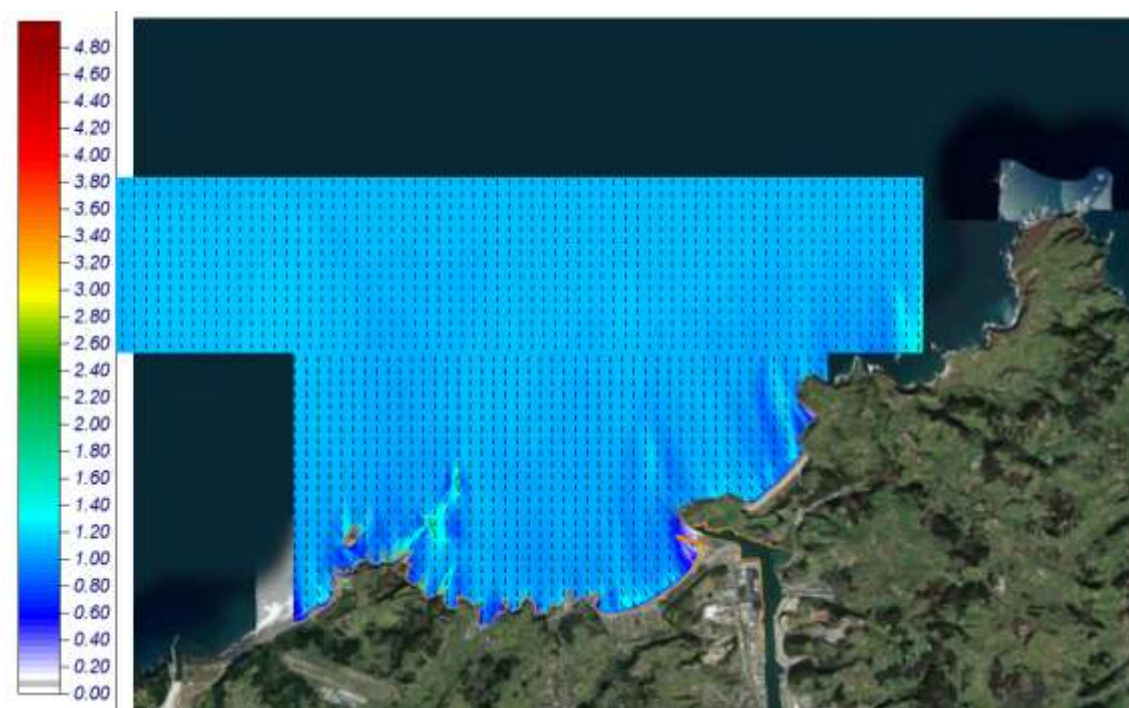


Ilustración 126: Condiciones medias N, $H_s=1.12\text{m}$. $T_p=11$ segundos. Pleamar

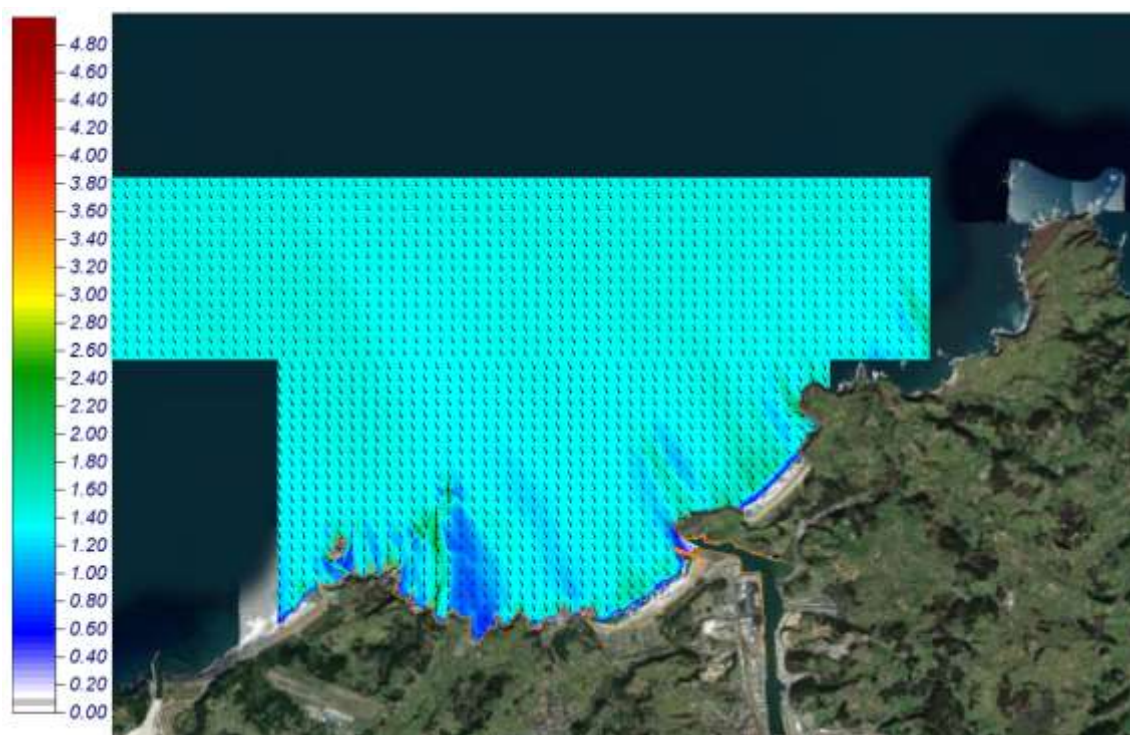


Ilustración 127: Condiciones medias NNW, $H_s=1.41\text{m}$. $T_p= 11$ segundos. Bajamar

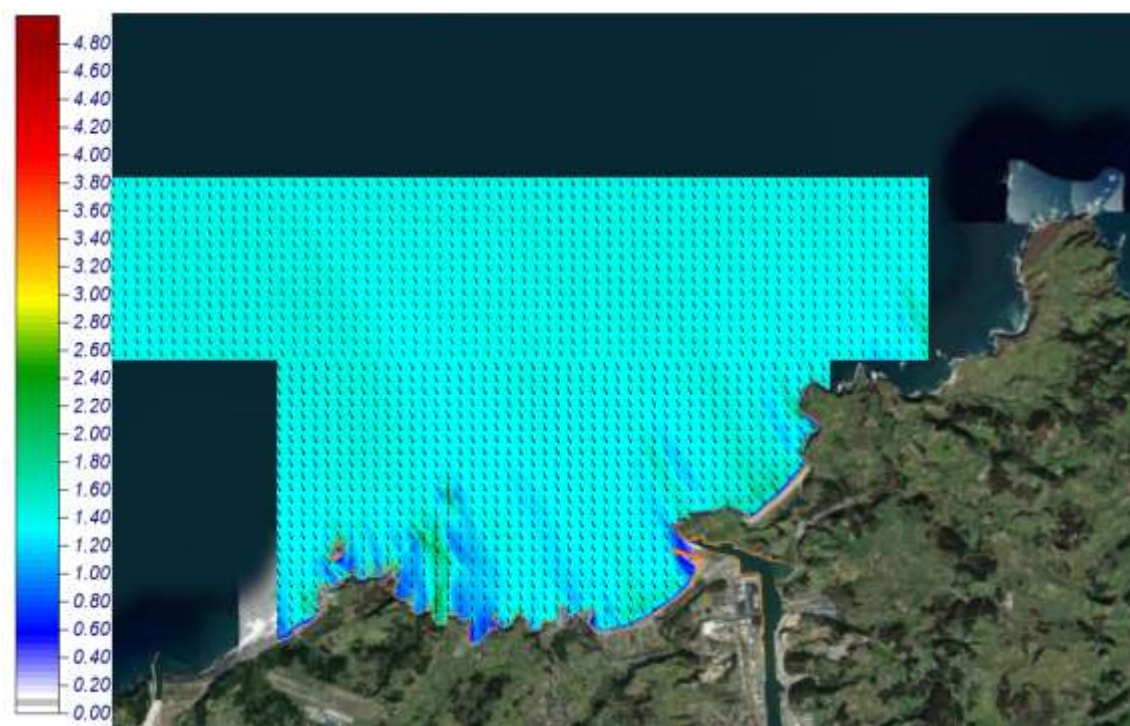


Ilustración 128: Condiciones medias NNW, $H_s=1.41\text{m}$. $T_p= 11$ segundos. Pleamar

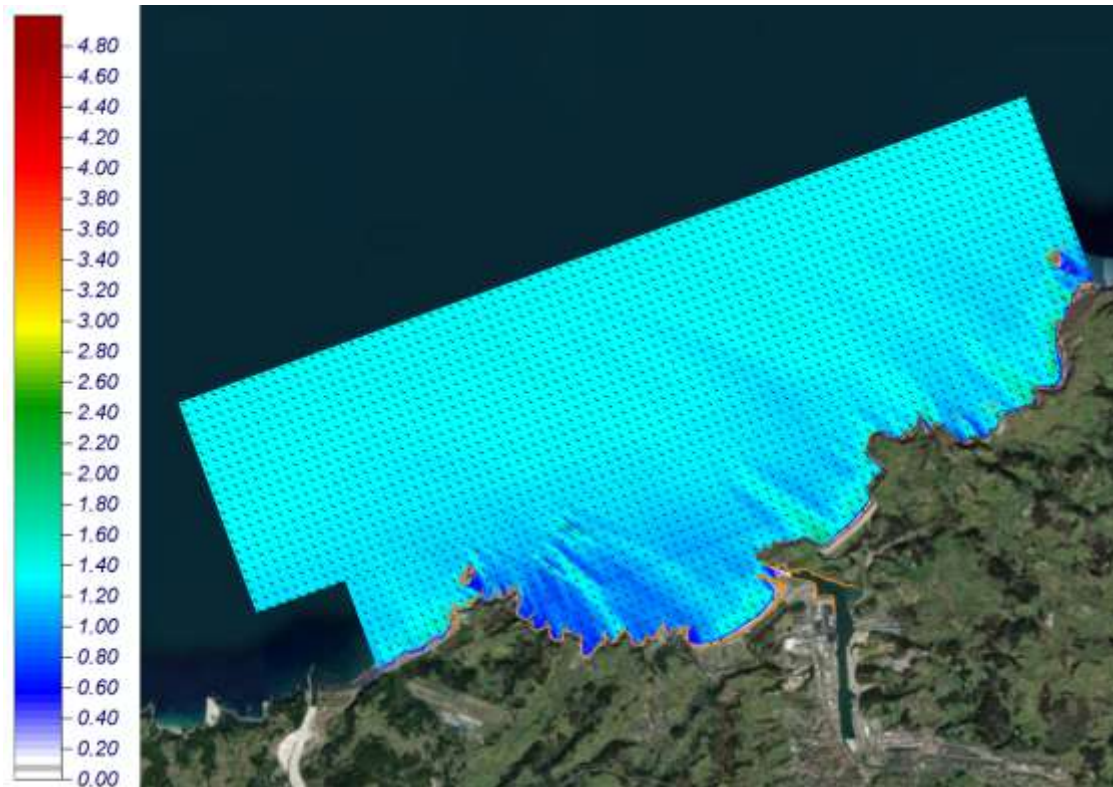


Ilustración 129: Condiciones medias WNW, $H_s=1.33\text{m}$. $T_p= 11$ segundos. Pleamar

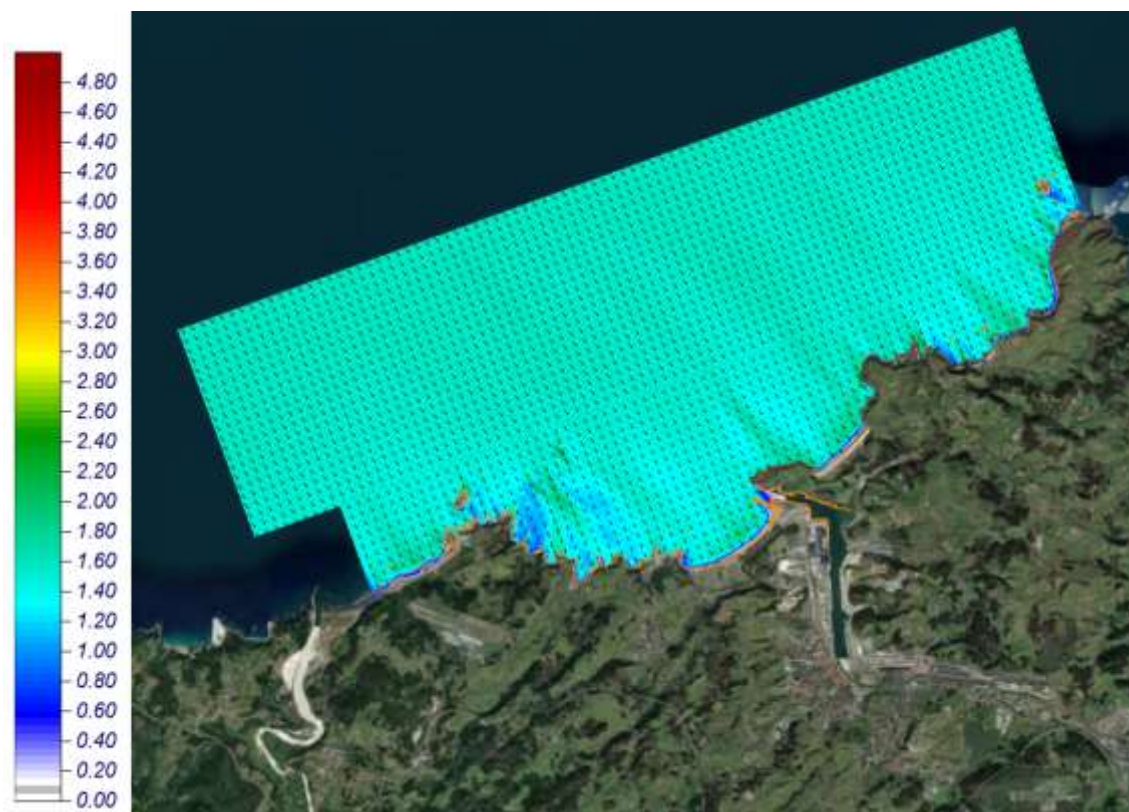


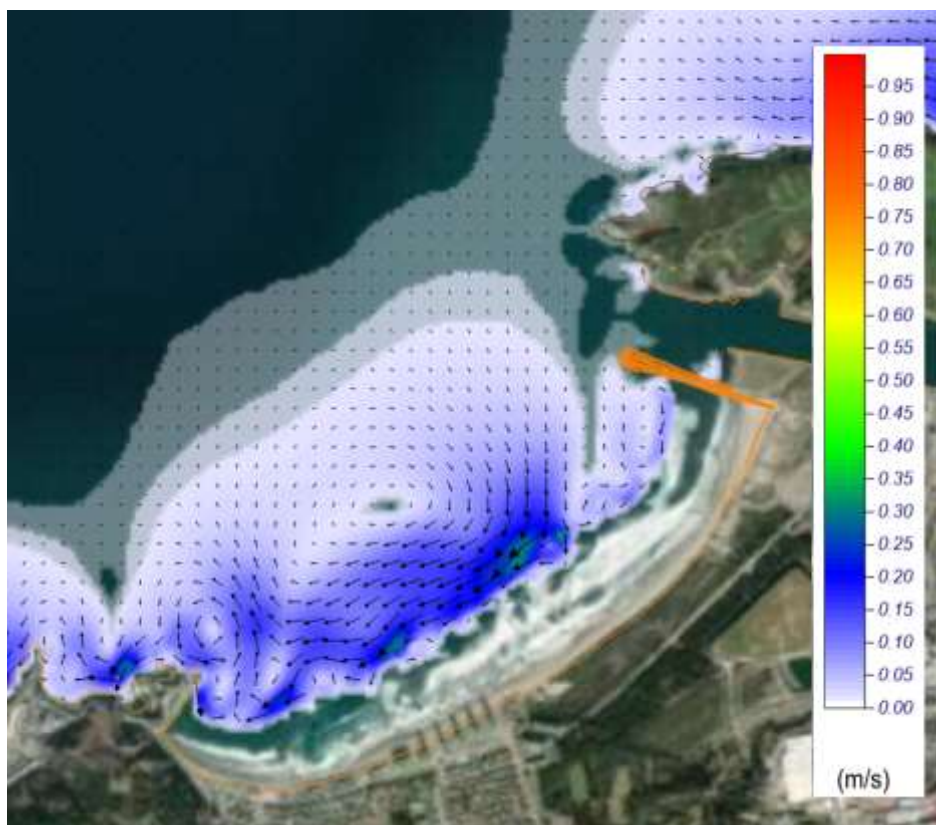
Ilustración 130: Condiciones medias NW, $H_s=1.59\text{m}$. $T_p= 11$ segundos. Pleamar.

12.2 Patrones de corrientes

Temporales



*Ilustración 131: Patrones de corrientes generados por los temporales del NE en pleamar.
 $H_s=2.20$ $T_p=14s$.*



*Ilustración 132: Patrones de corrientes generados por los temporales del NNE en bajamar.
 $H_s=3.33$ $T_p=14s$.*



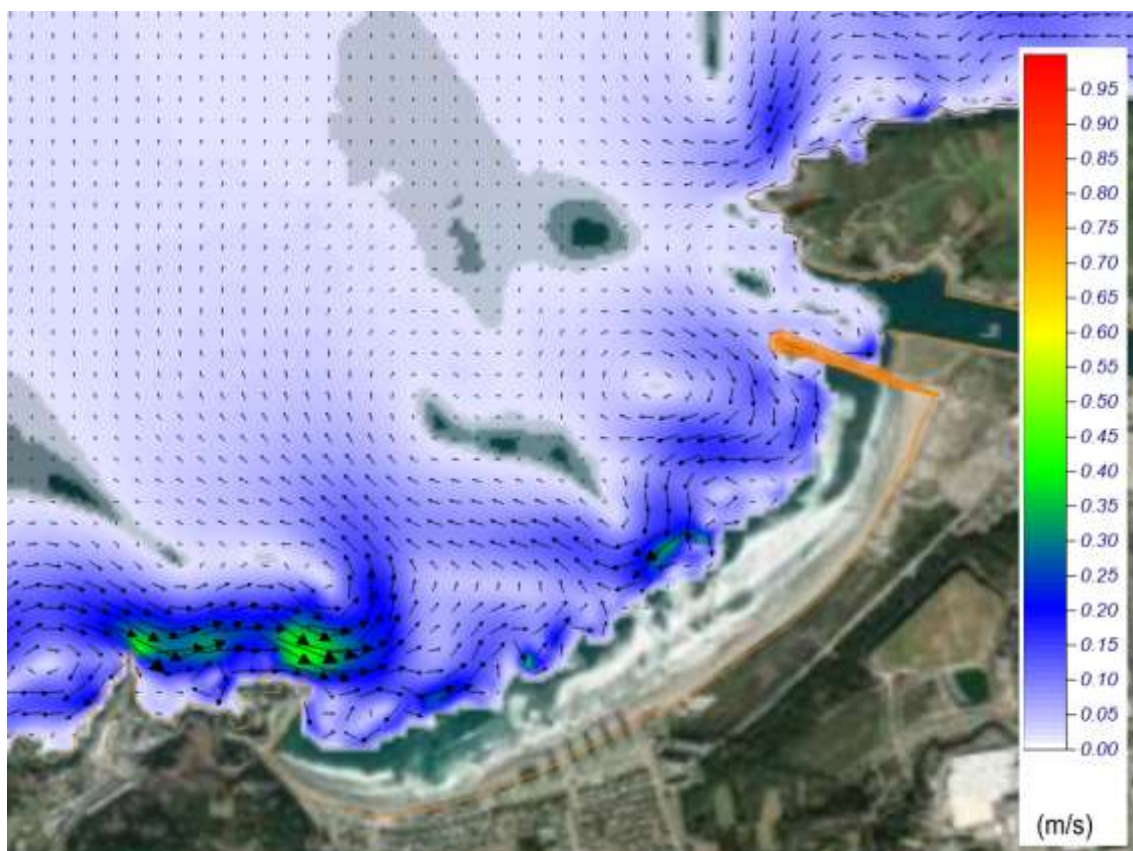
*Ilustración 133: Patrones de corrientes generados por los temporales del NNE en pleamar.
 $H_s=3.33$ $T_p=14s$.*



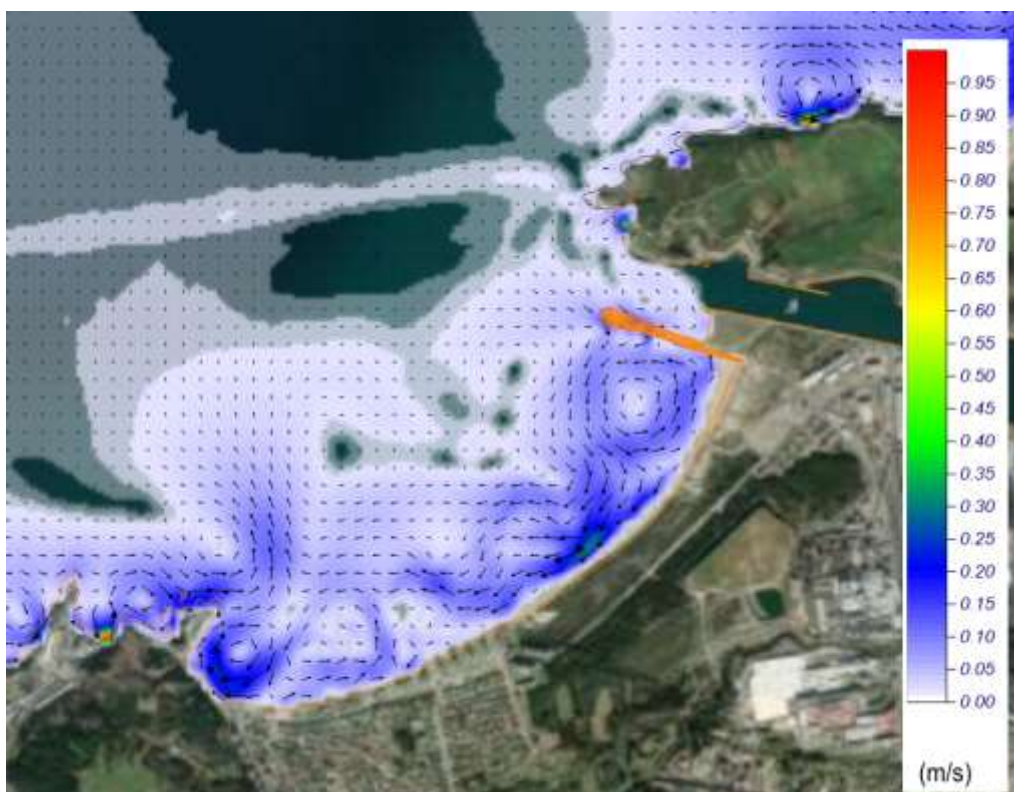
*Ilustración 134: Patrones de corrientes generados por los temporales del N en bajamar.
 $H_s=3.94$ $T_p=12s$.*



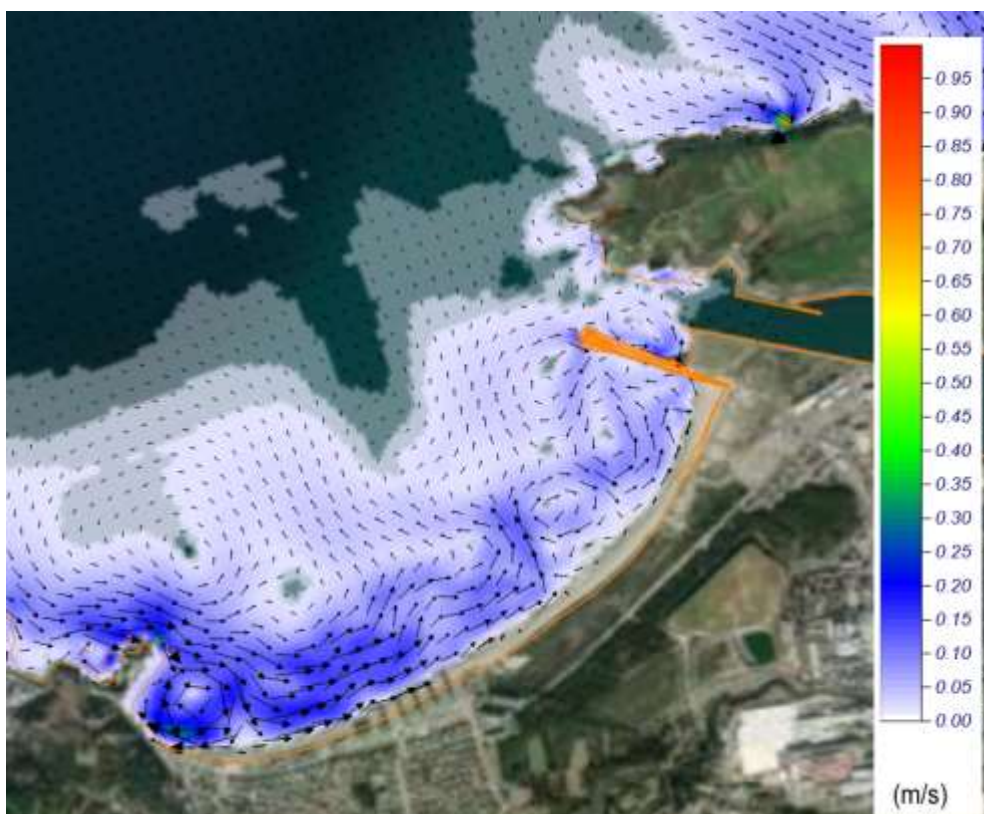
*Ilustración 135: Patrones de corrientes generados por los temporales del N en pleamar.
 $H_s=3.94$ $T_p=12s$.*



*Ilustración 136: Patrones de corrientes generados por los temporales del NNW en bajamar.
 $H_s=5.72$ $T_p=18s$.*

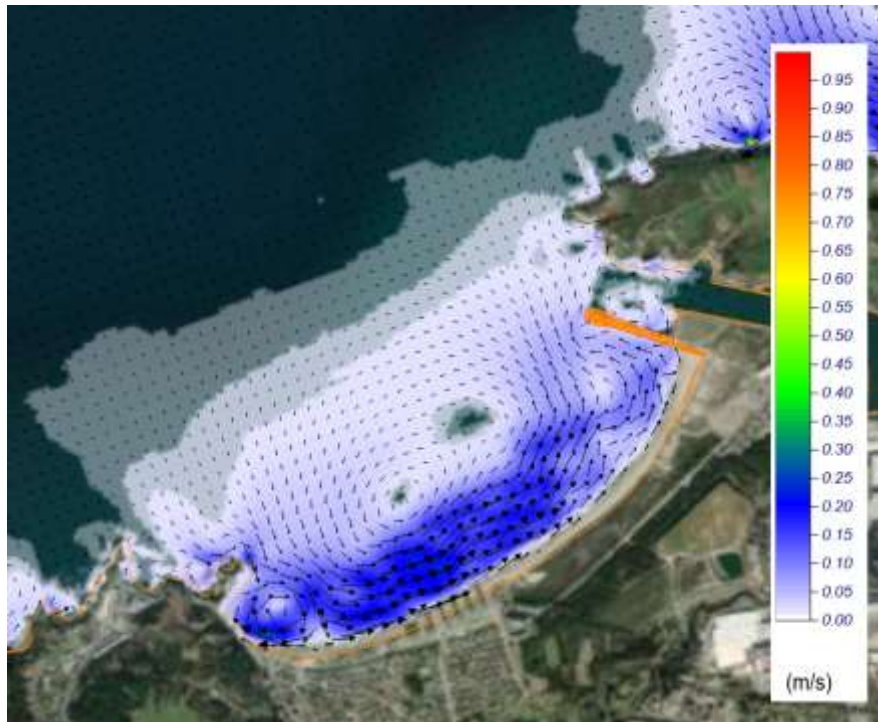


*Ilustración 137: Patrones de corrientes generados por los temporales del NNW en pleamar.
 $H_s=5.72$ $T_p=18s$.*



*Ilustración 138: Patrones de corrientes generados por los temporales del NW en pleamar.
 $H_s=5.46$ $T_p=17s$.*

Condiciones medias



*Ilustración 139: Patrones de corrientes generados por los temporales del WNW en pleamar.
 $H_s=3.98$ $T_p=17s$.*

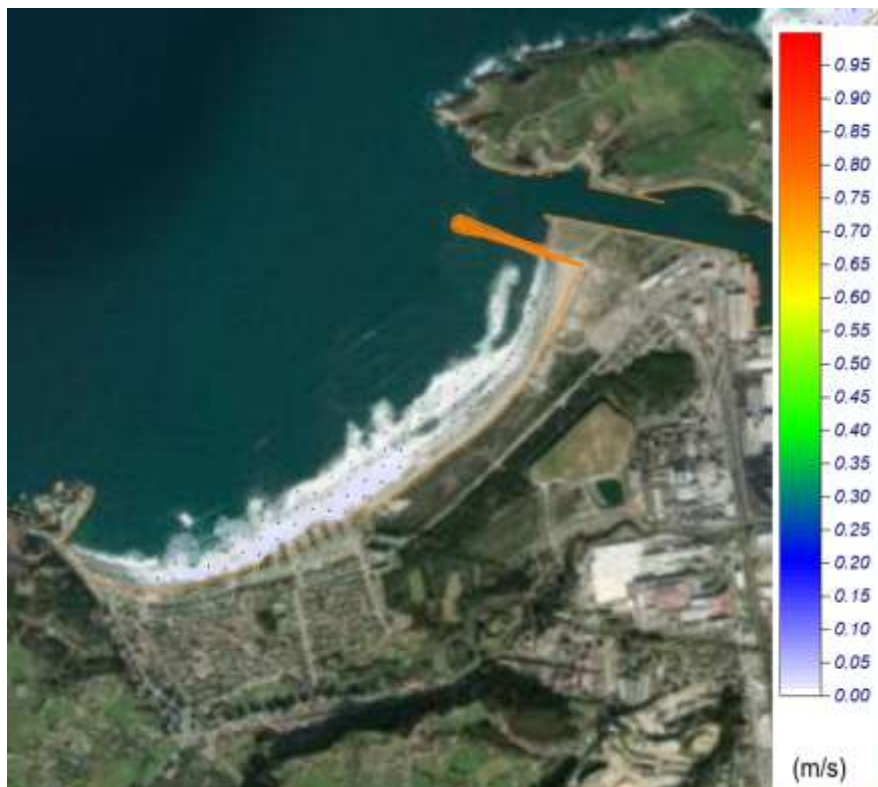


Ilustración 140: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NE en pleamar. $H_s=1.04$ $T_p=10s$.



Ilustración 141: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NNE en pleamar. $H_s=1$ $T_p=10s$.



Ilustración 142: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NNE en bajamar. $H_s=1$ $T_p=10s$.

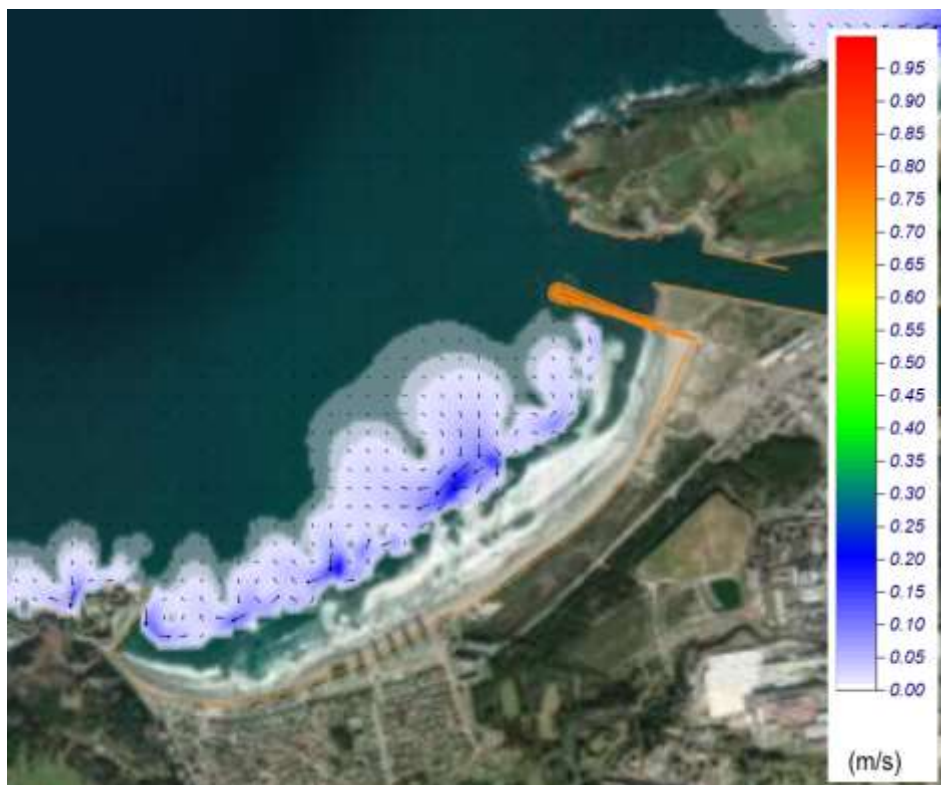


Ilustración 143: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del N en bajamar.
 $H_s=1.12$ $T_p=11s$.

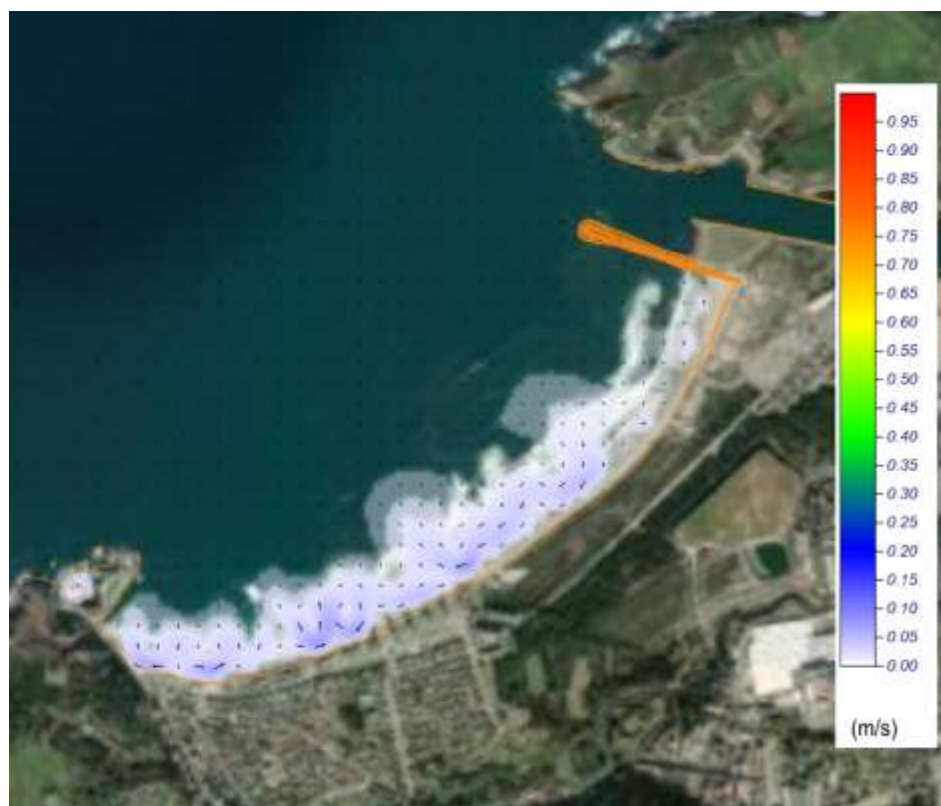


Ilustración 144: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del N en pleamar.
 $H_s=1.12$ $T_p=11s$.

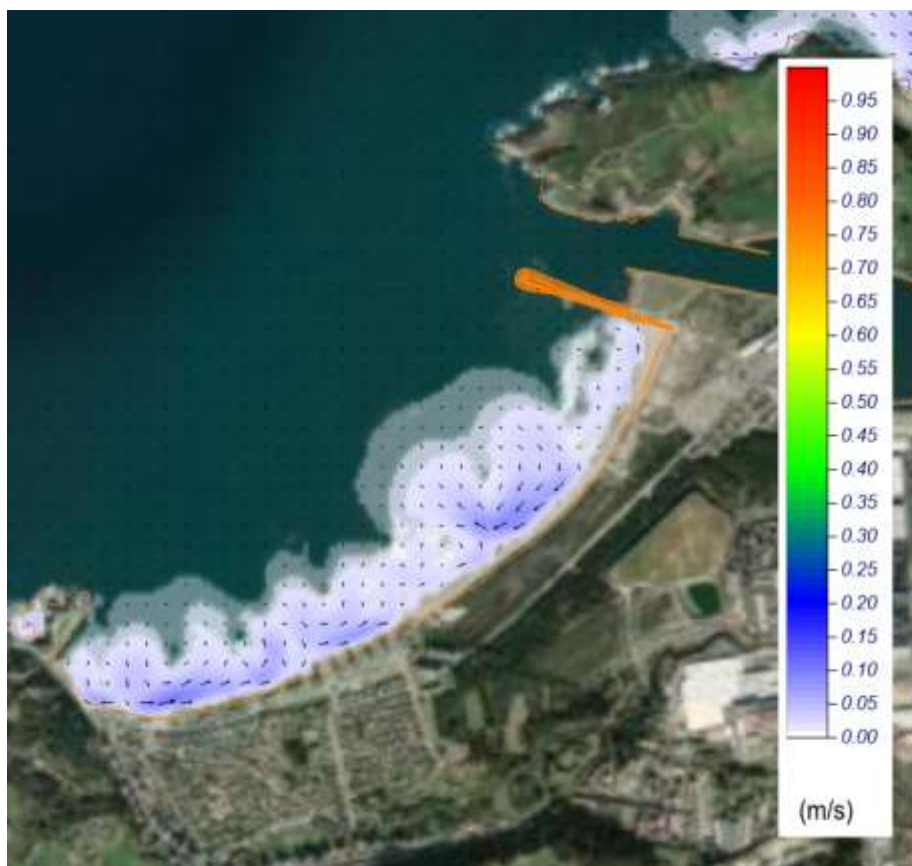


Ilustración 145: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NNW en pleamar. $H_s=1.41$ $T_p=11s$.

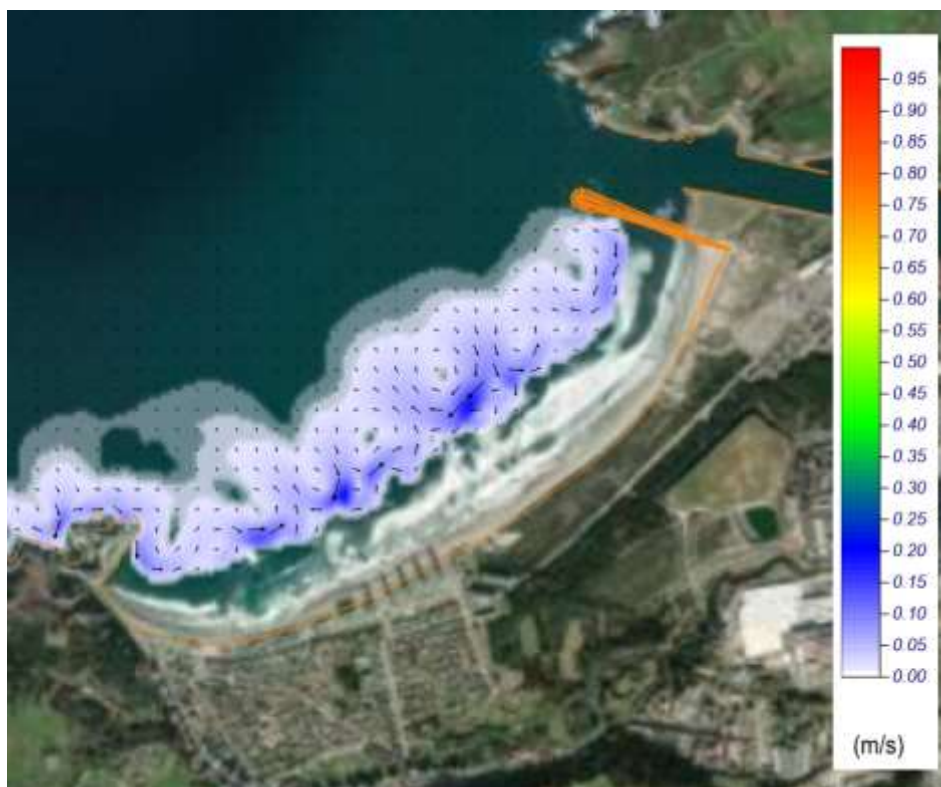


Ilustración 146: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NNW en bajamar. $H_s=1.41$ $T_p=11s$.

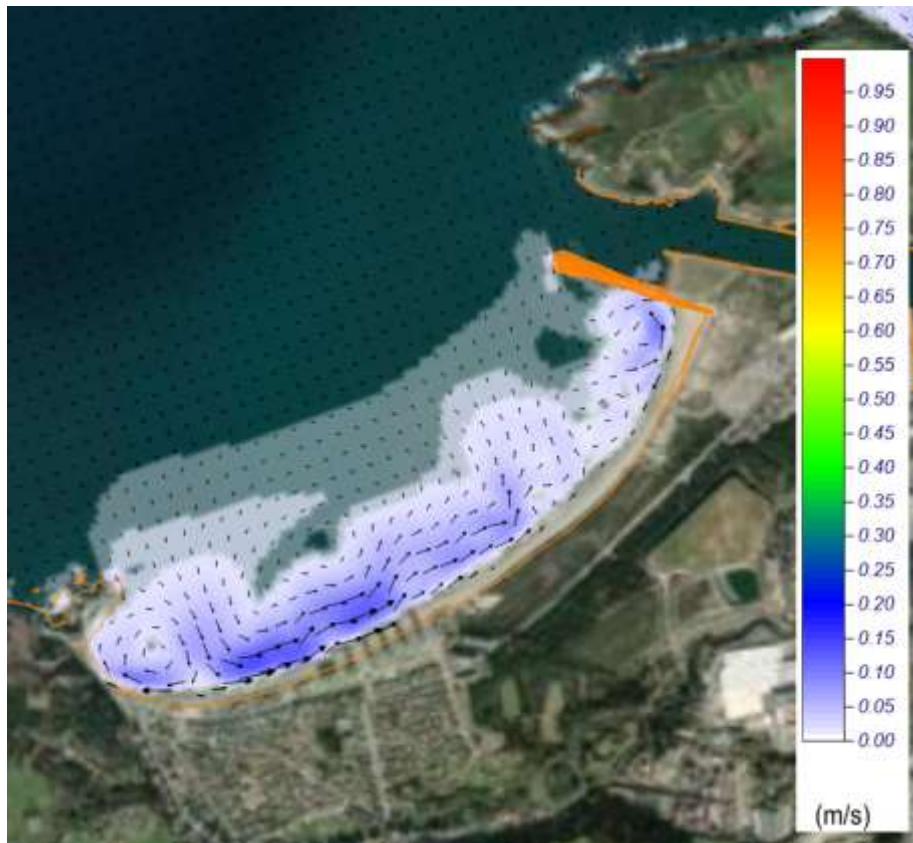


Ilustración 147: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del NW en pleamar. $H_s=1.59$ $T_p=11s$.

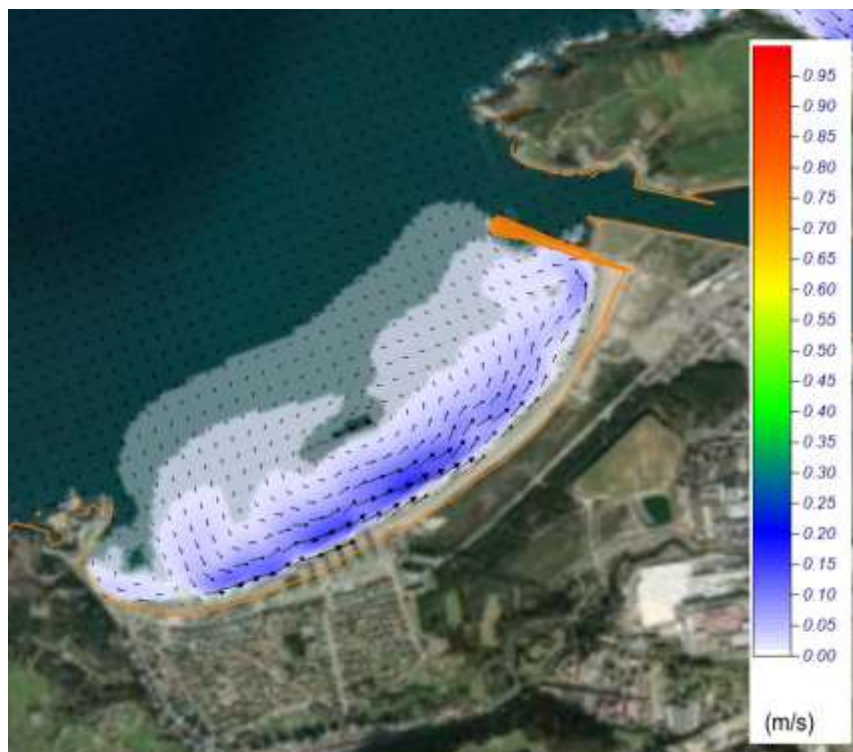
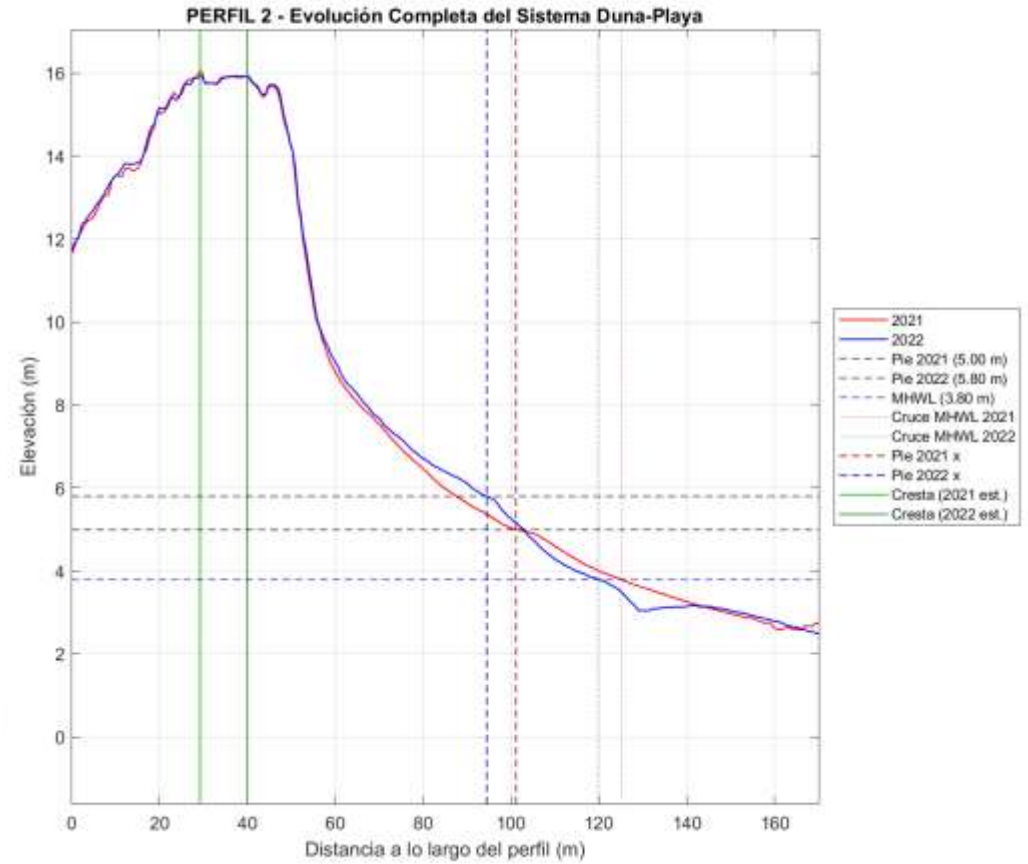
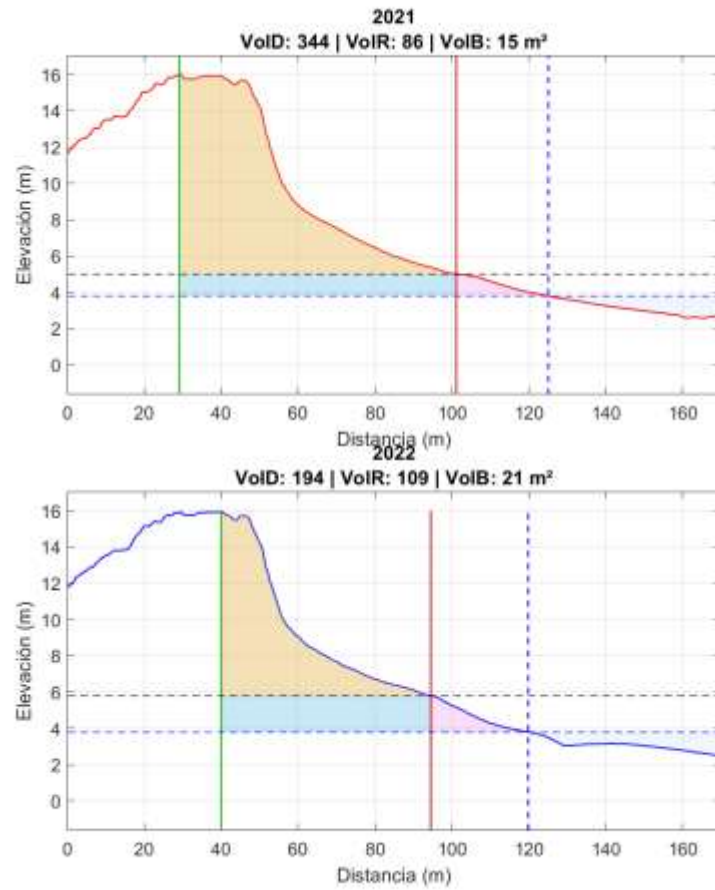
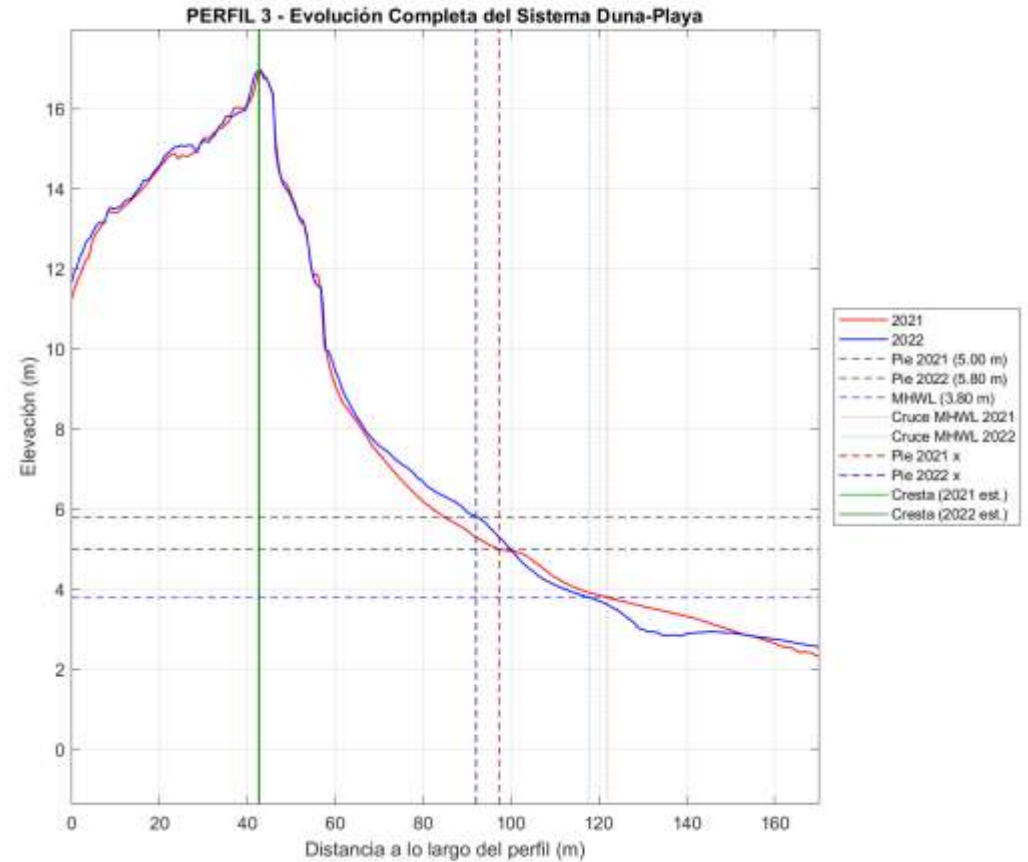
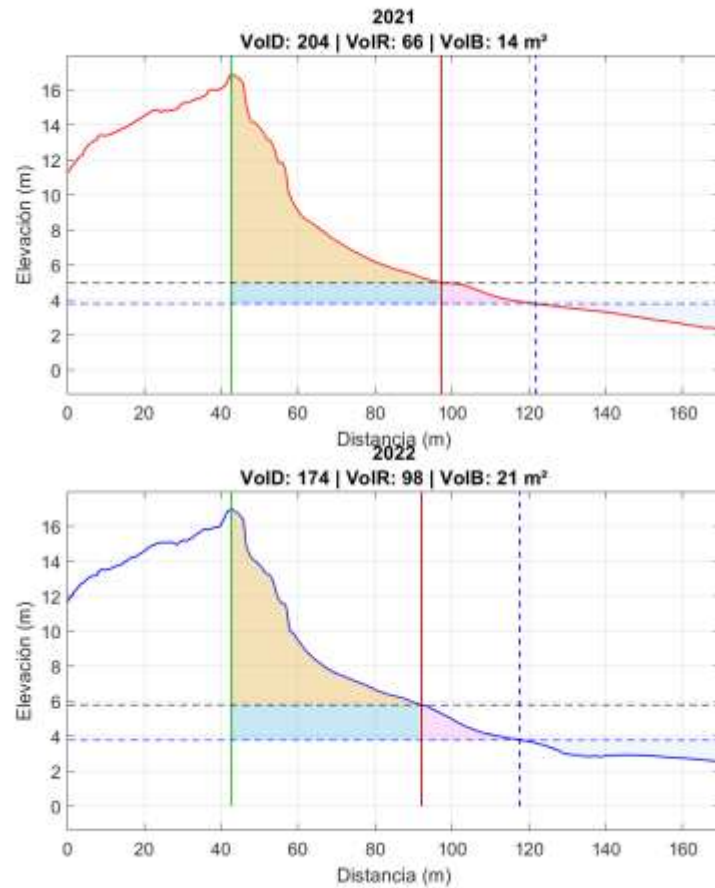
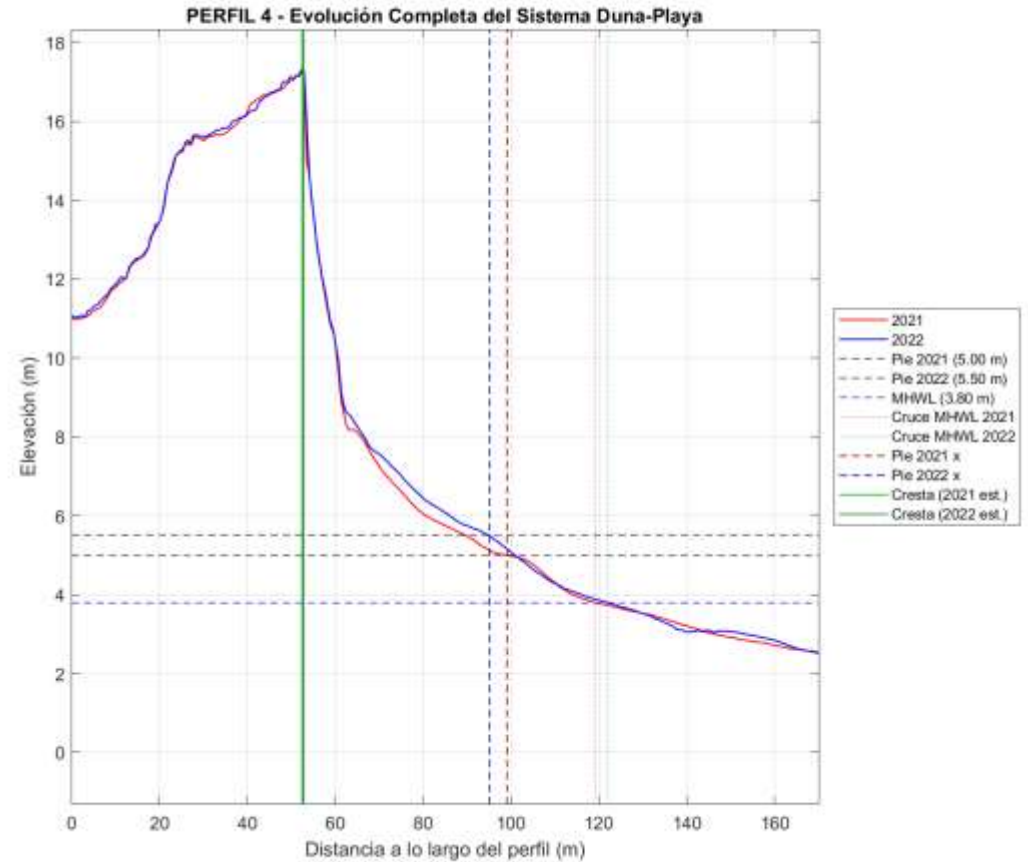
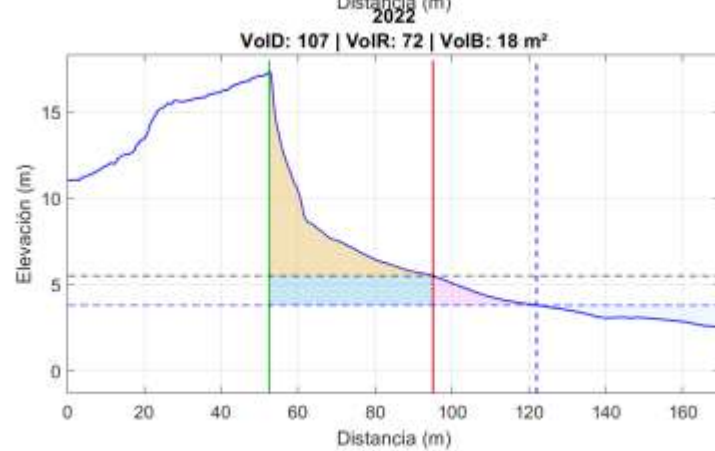
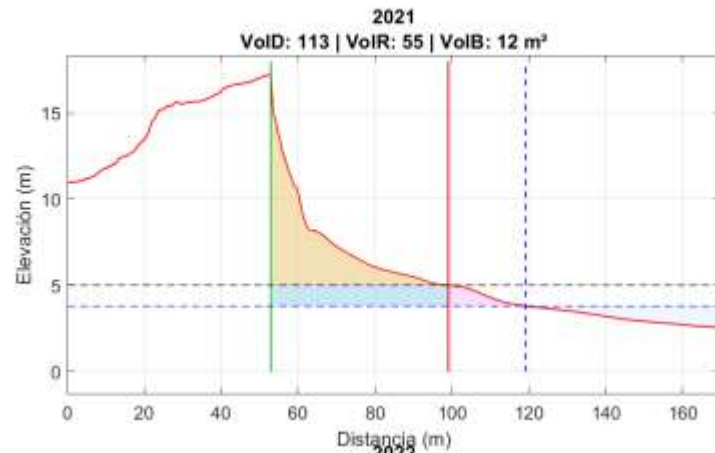
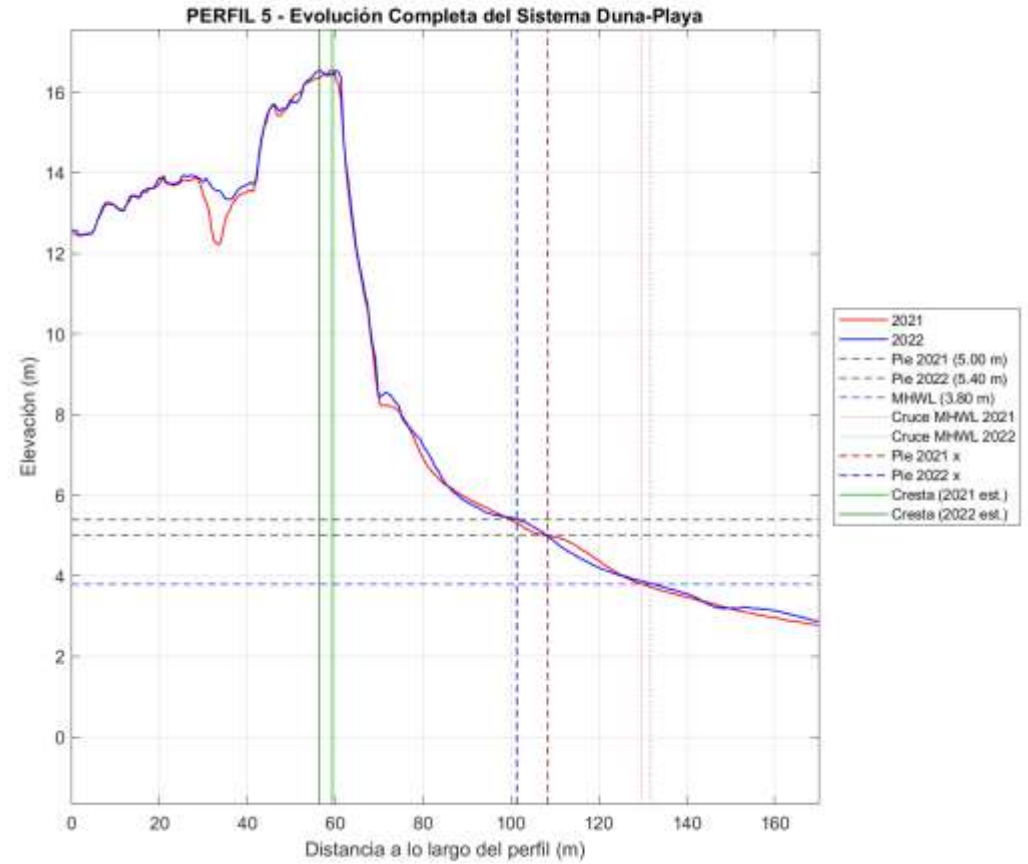
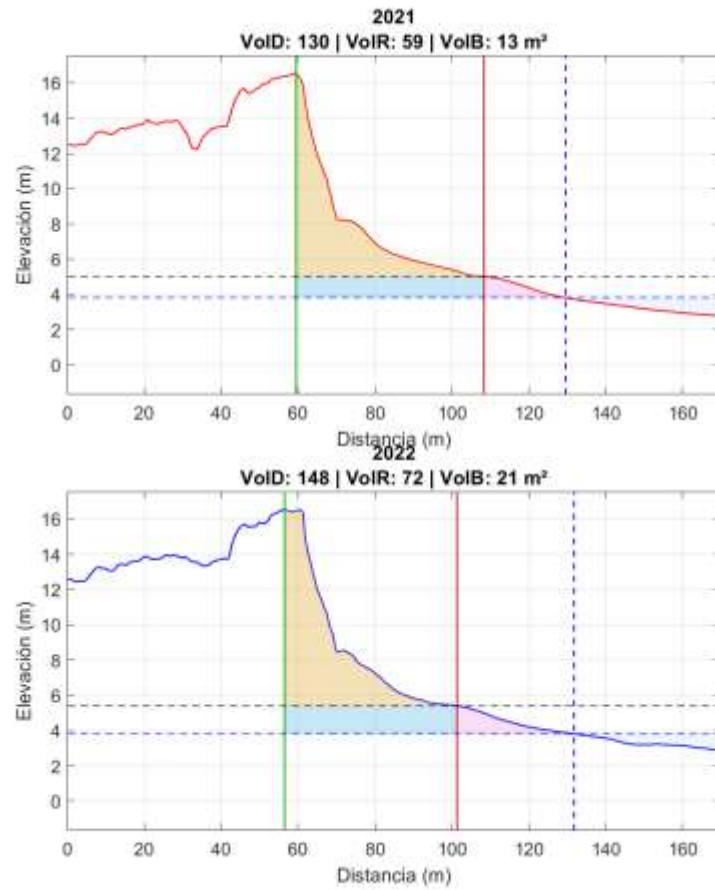


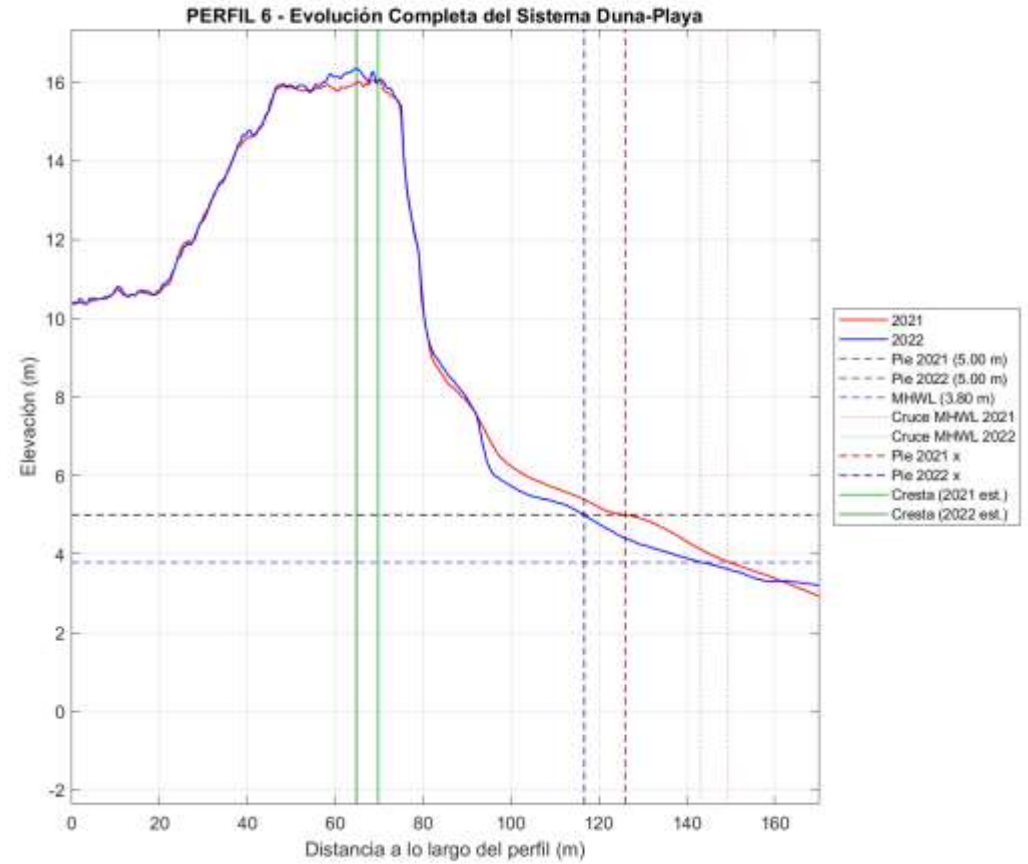
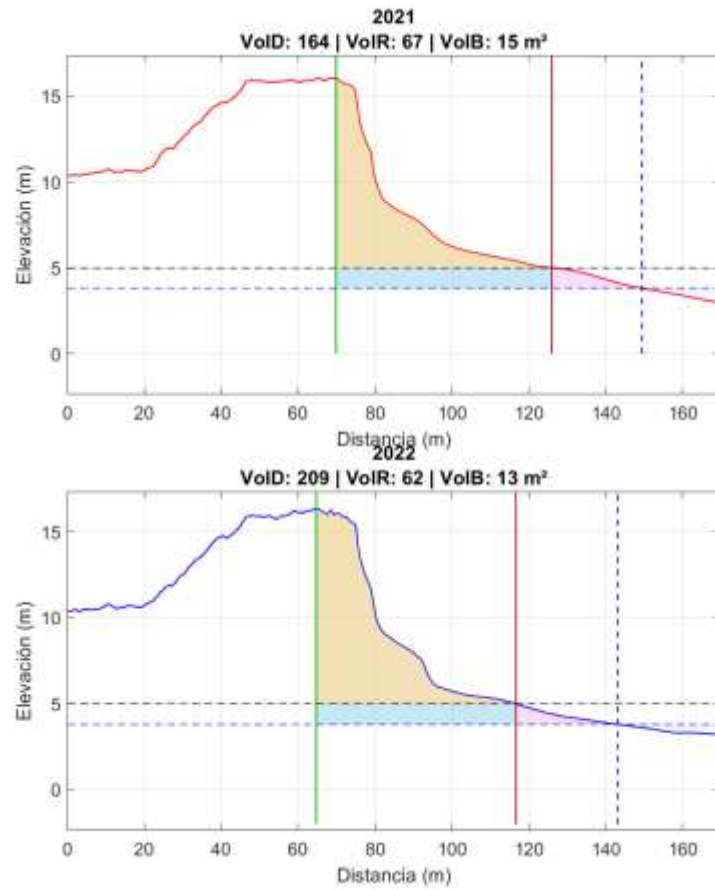
Ilustración 148: Patrones de corrientes generados por condiciones medias del WNW en pleamar. $H_s=1.33$ $T_p=11s$.

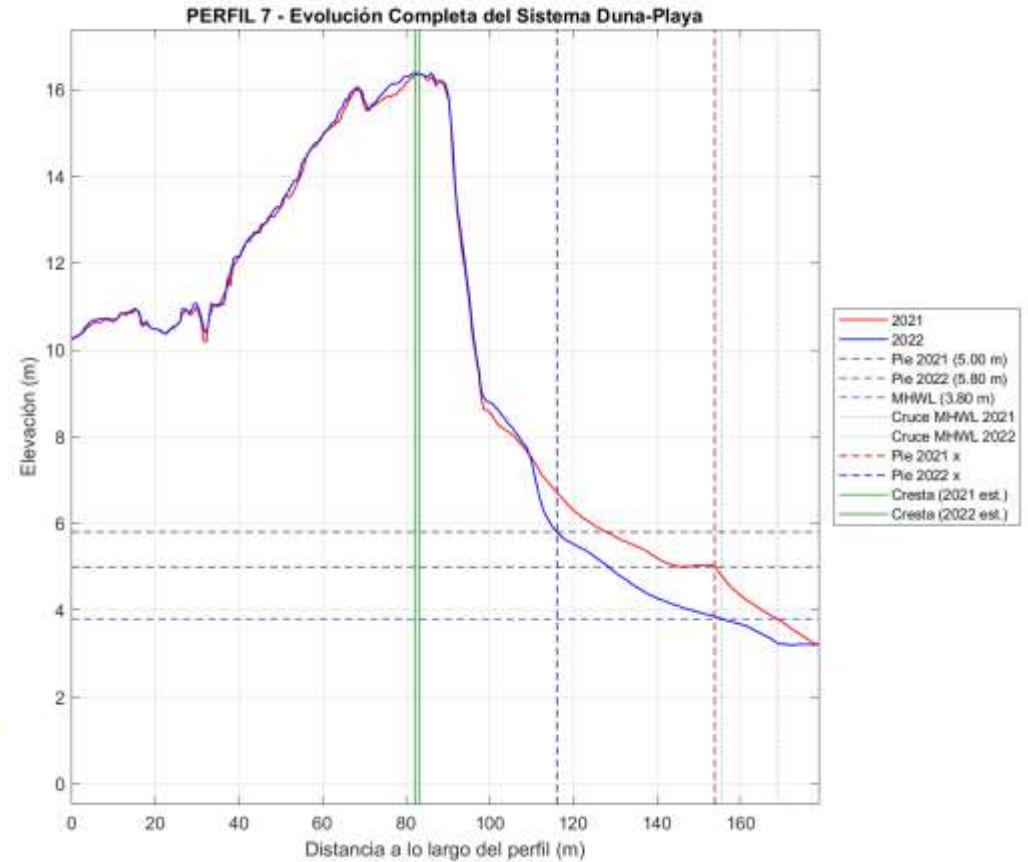
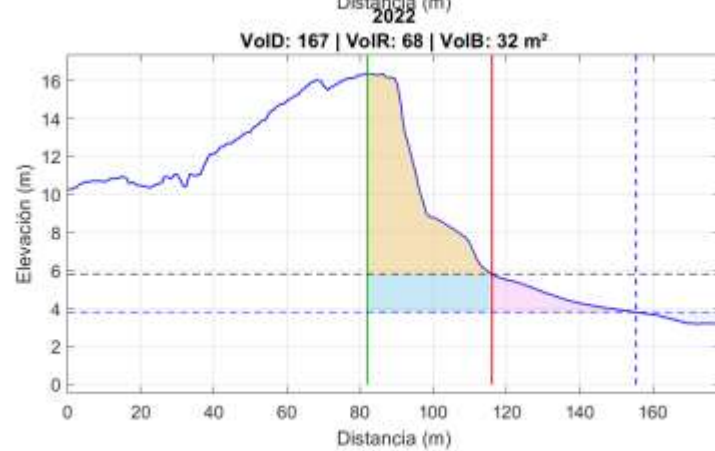
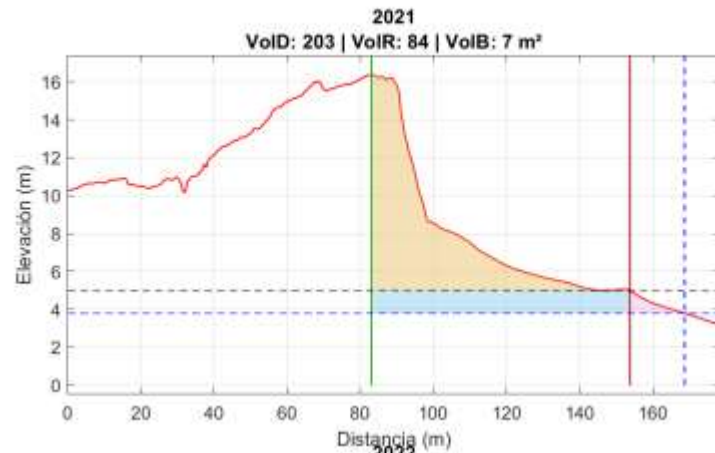


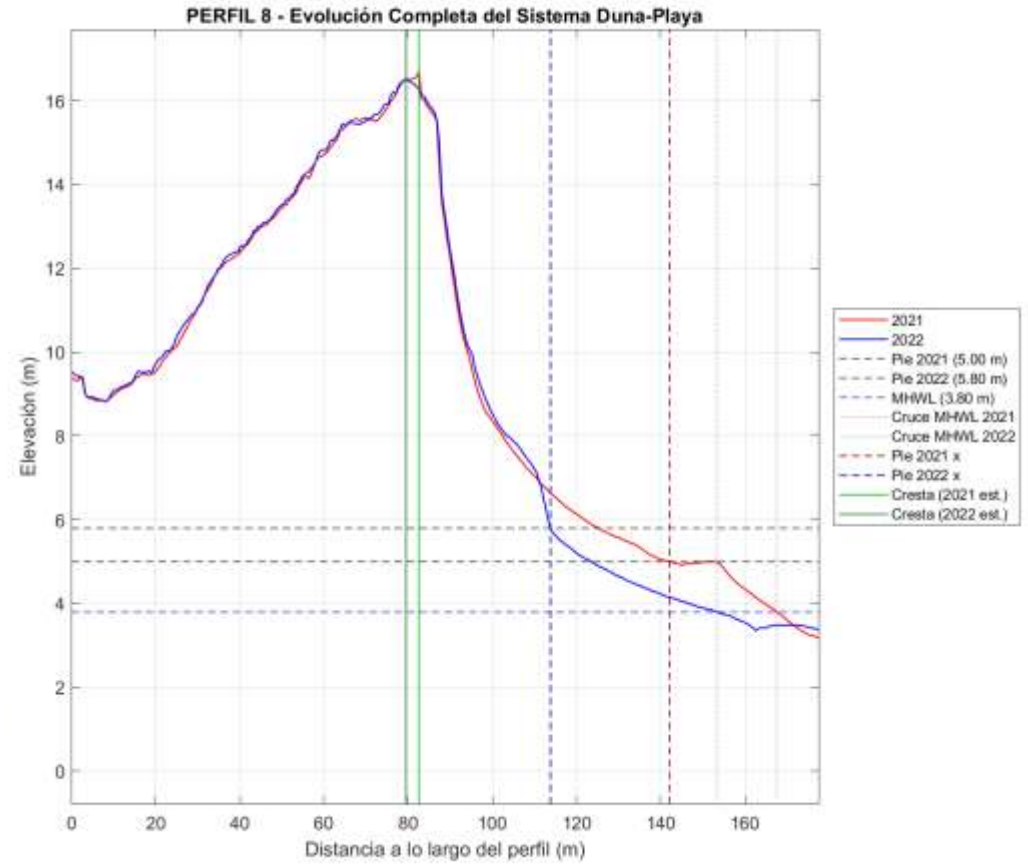
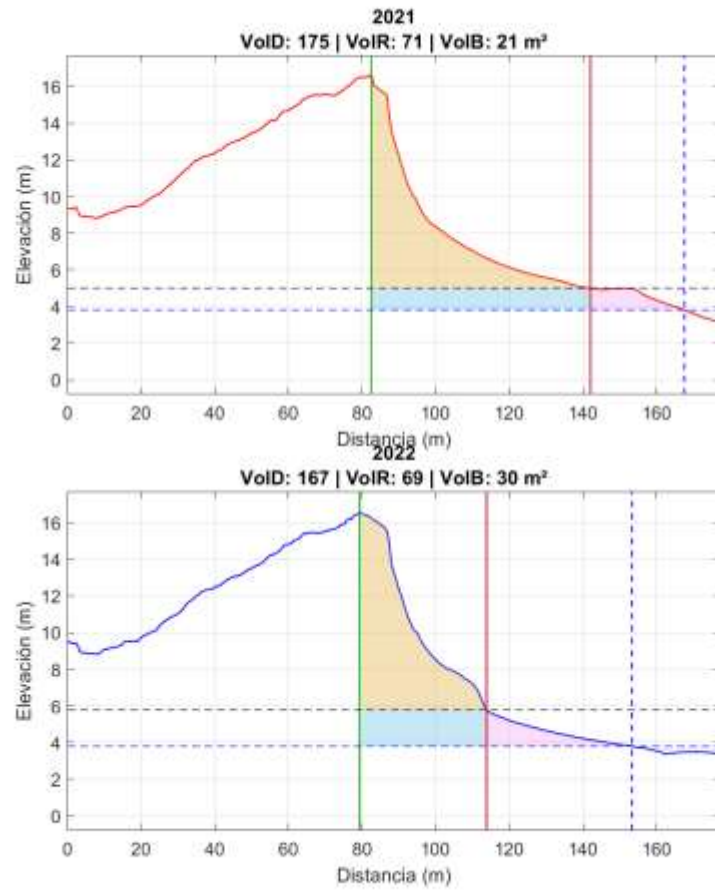


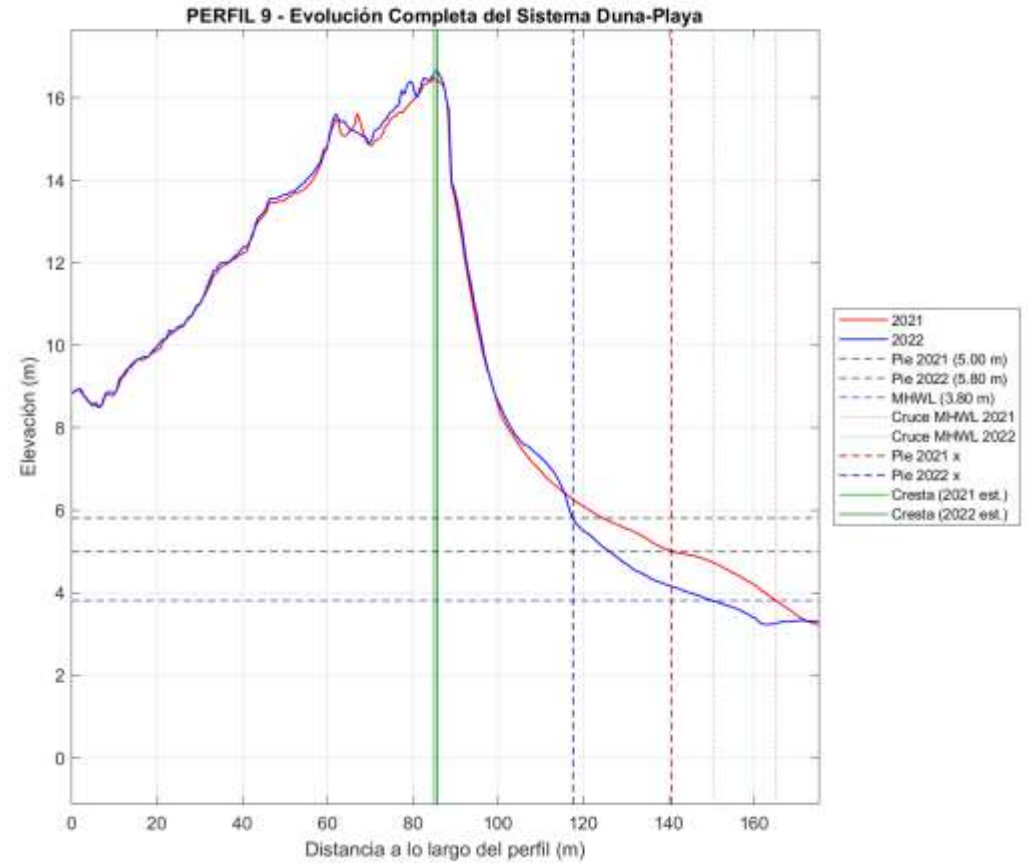
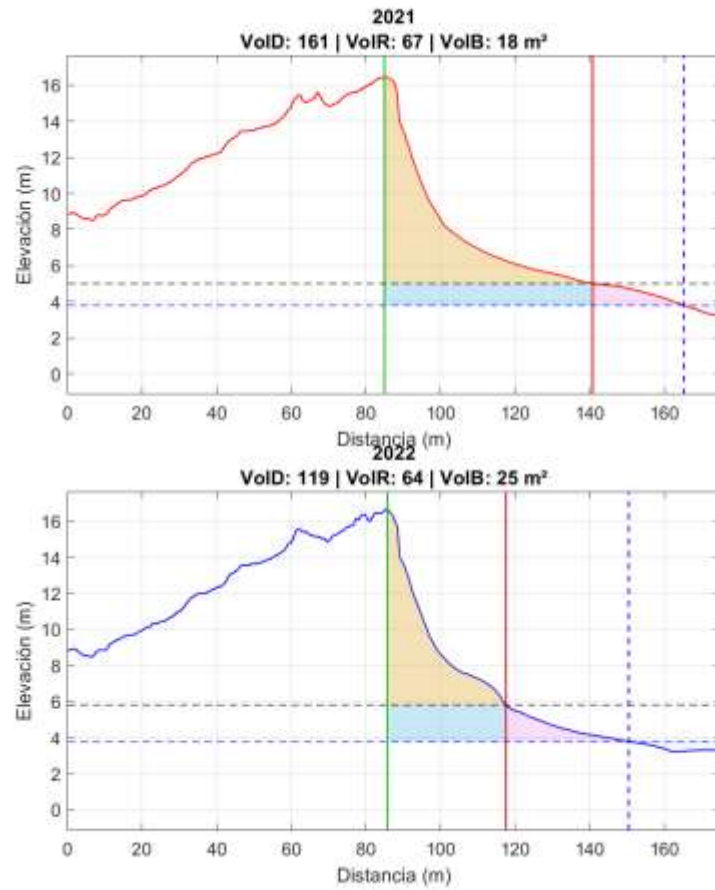


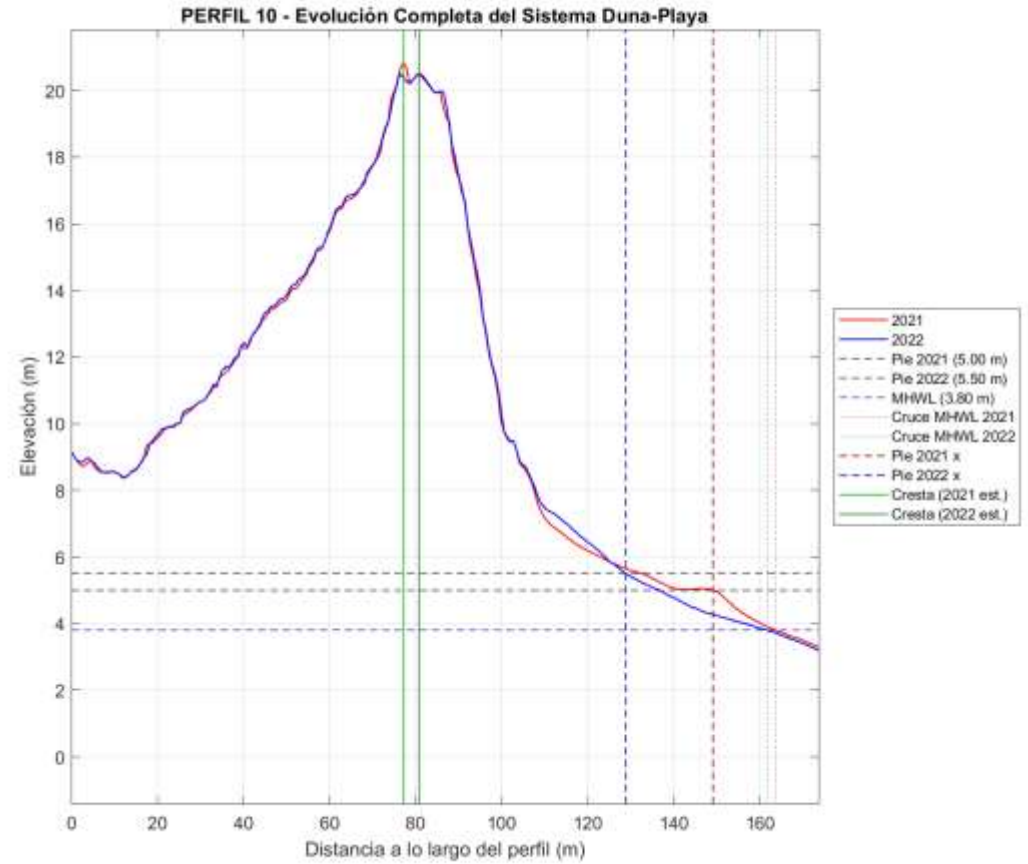
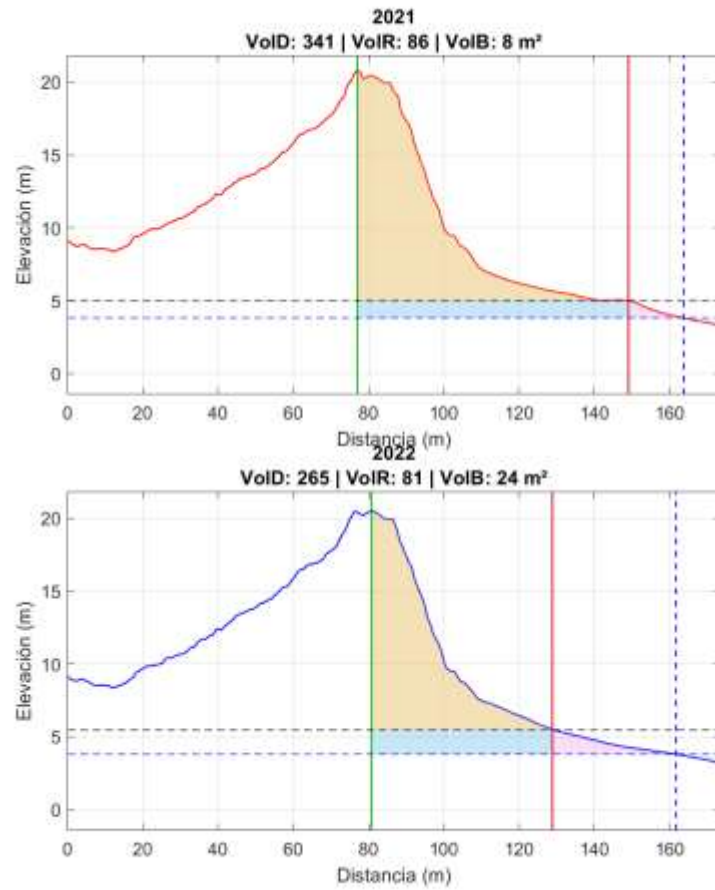


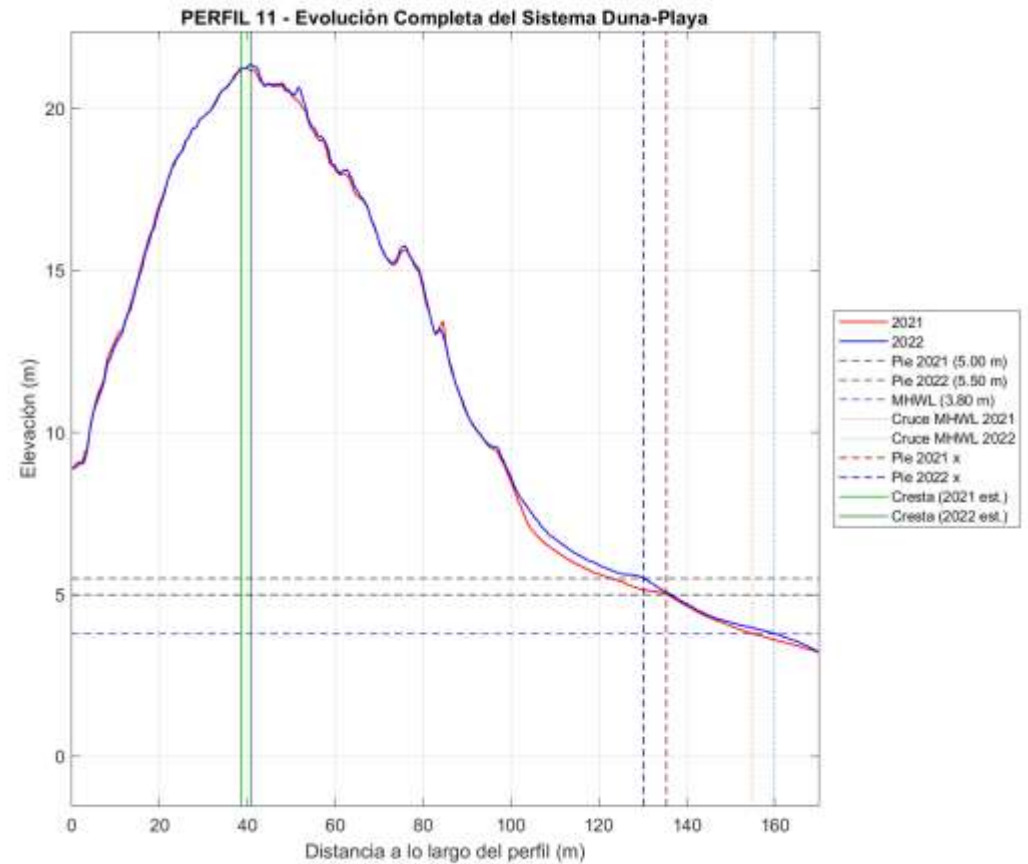
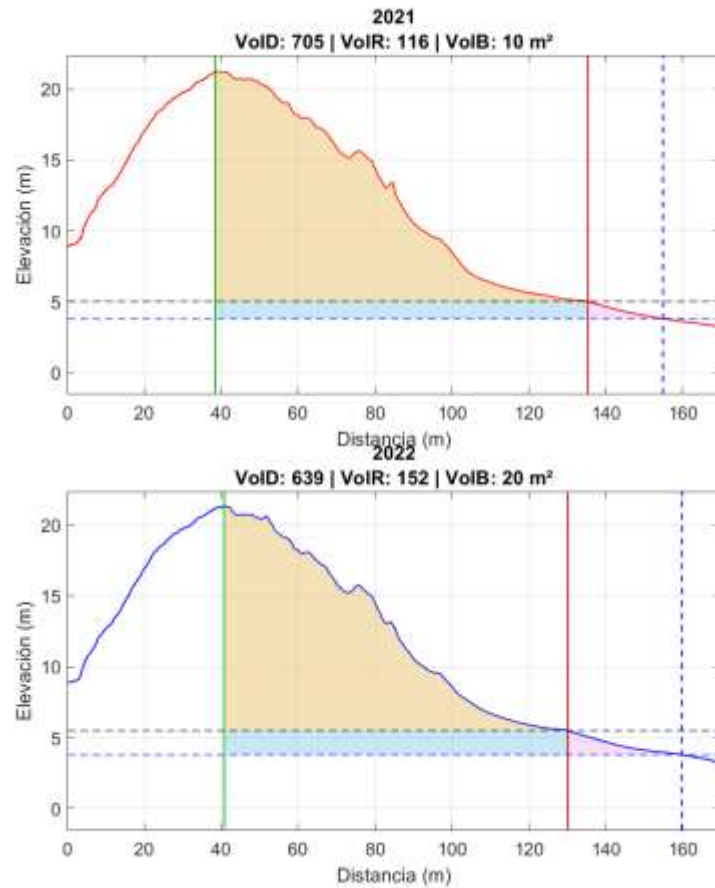


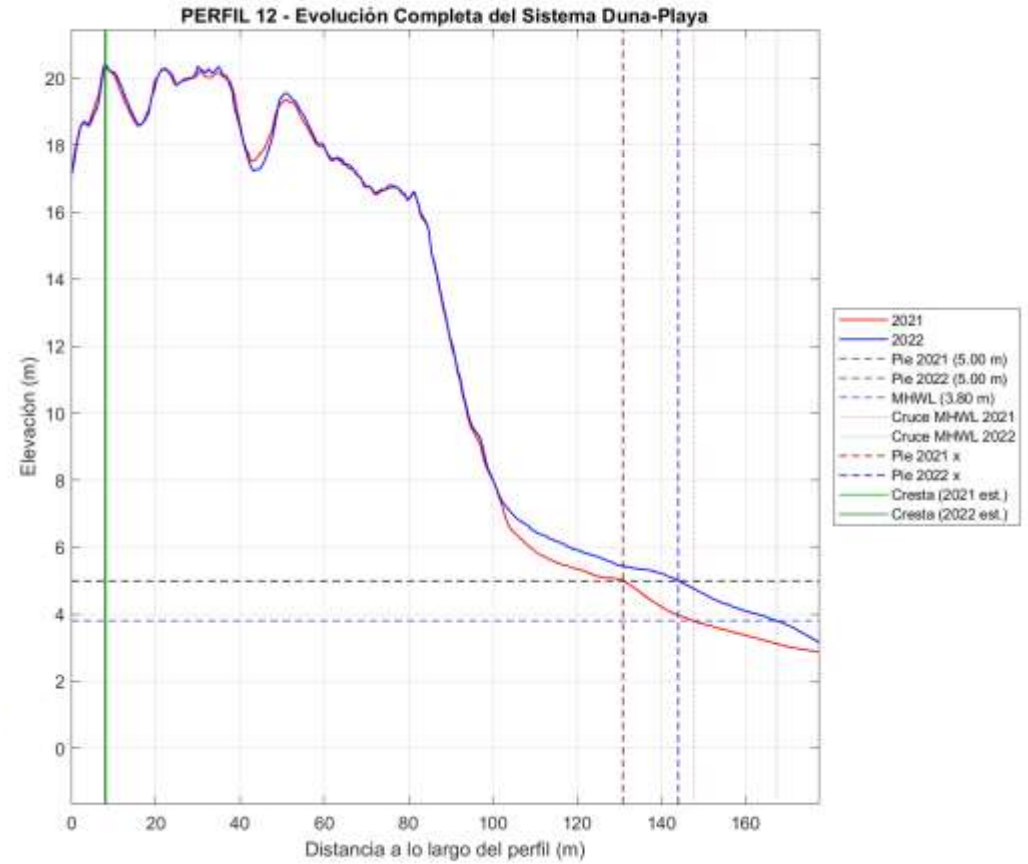
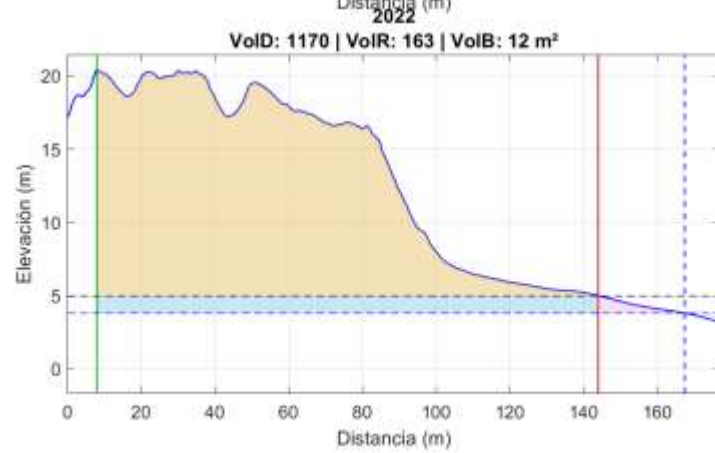
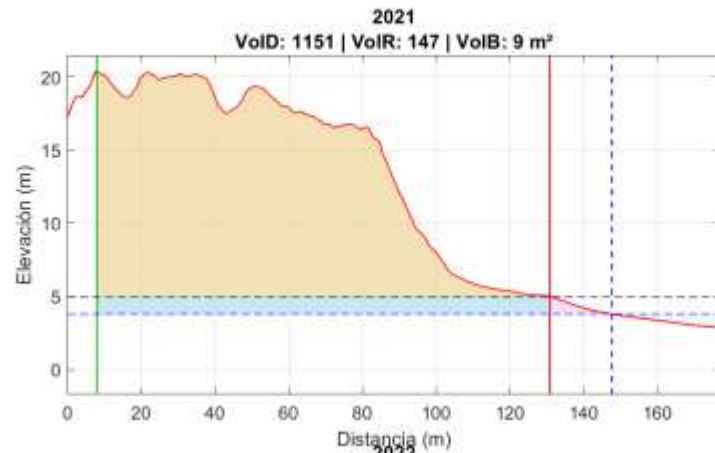


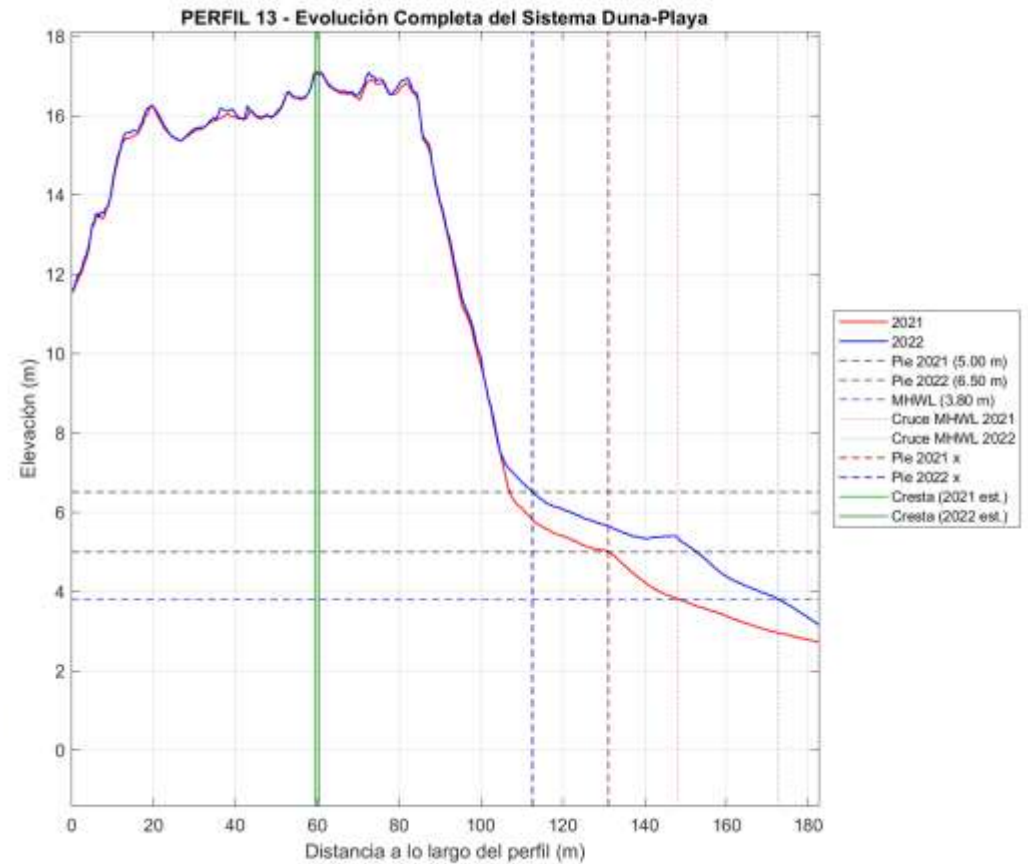
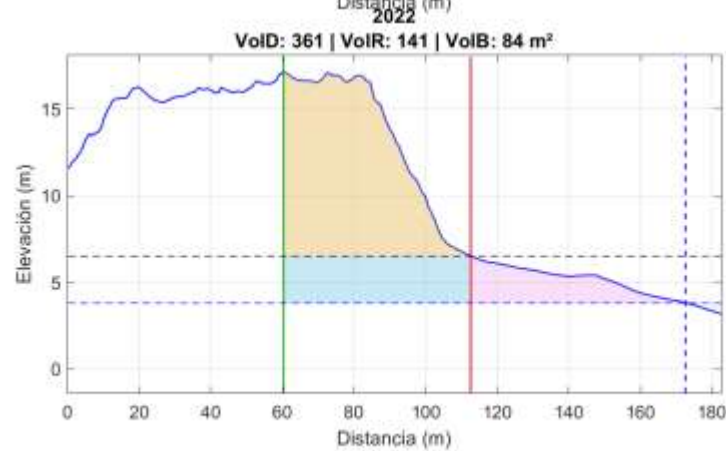
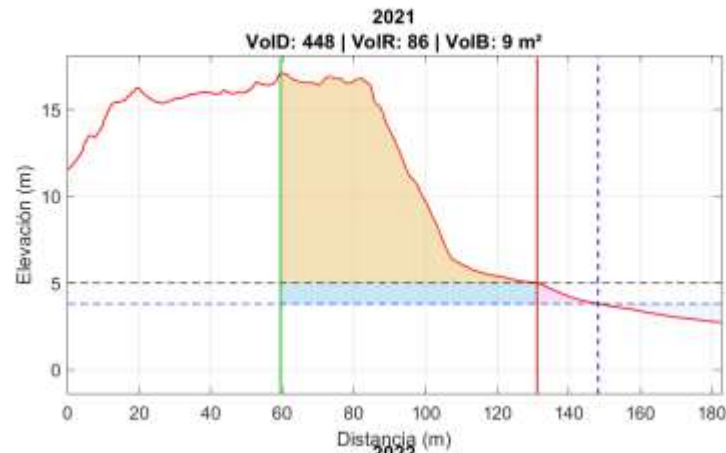




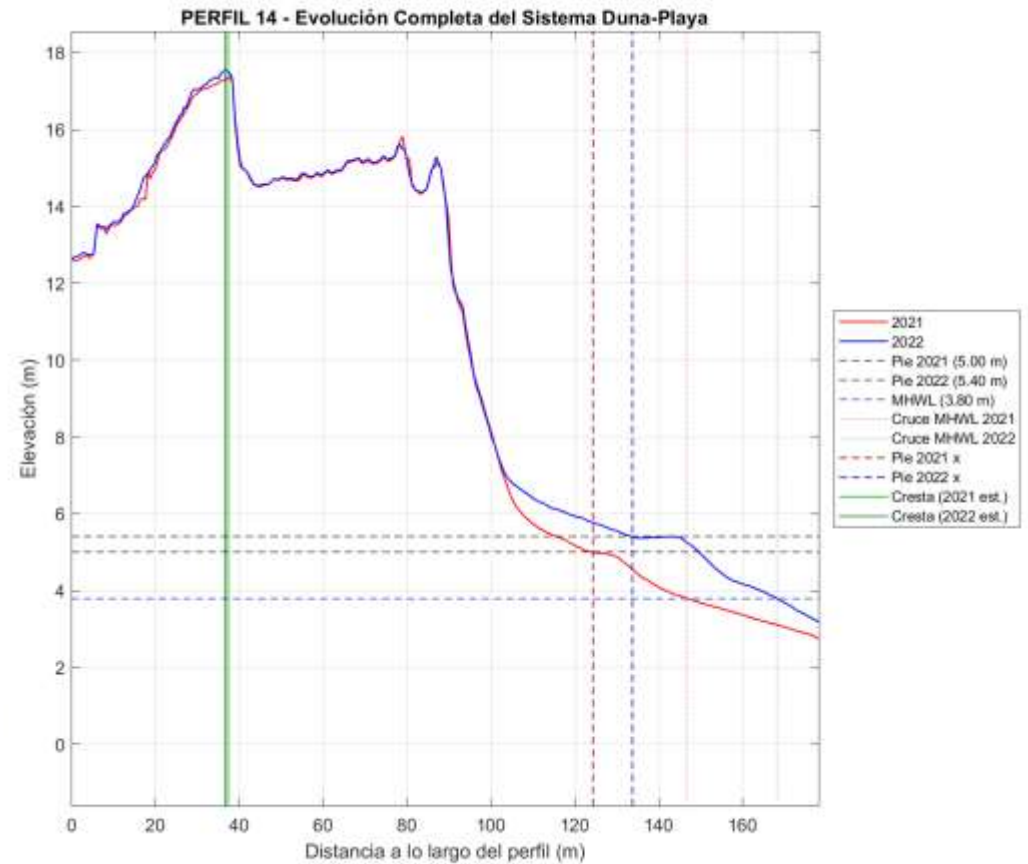
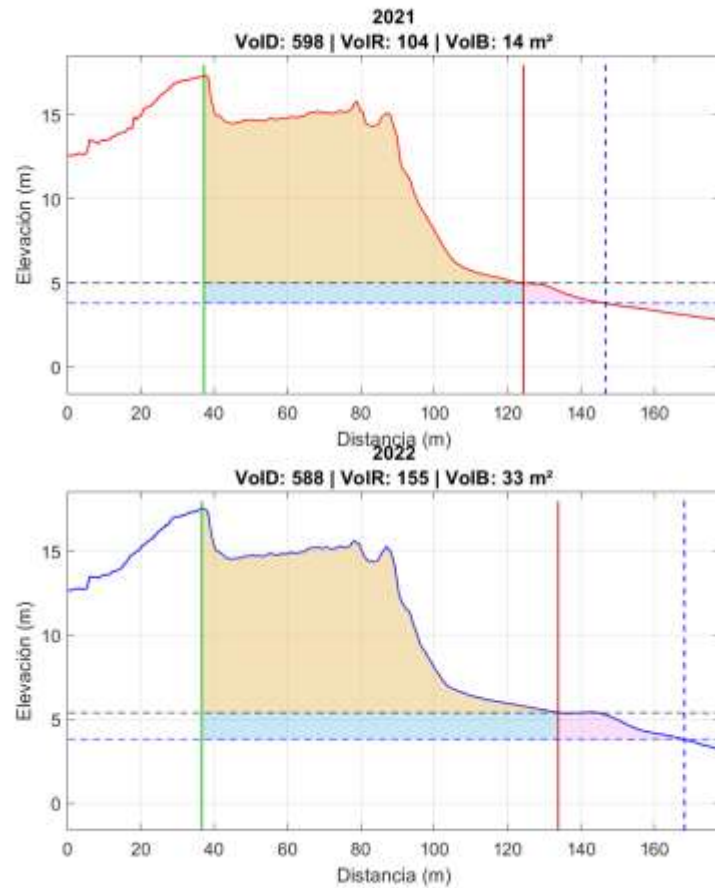


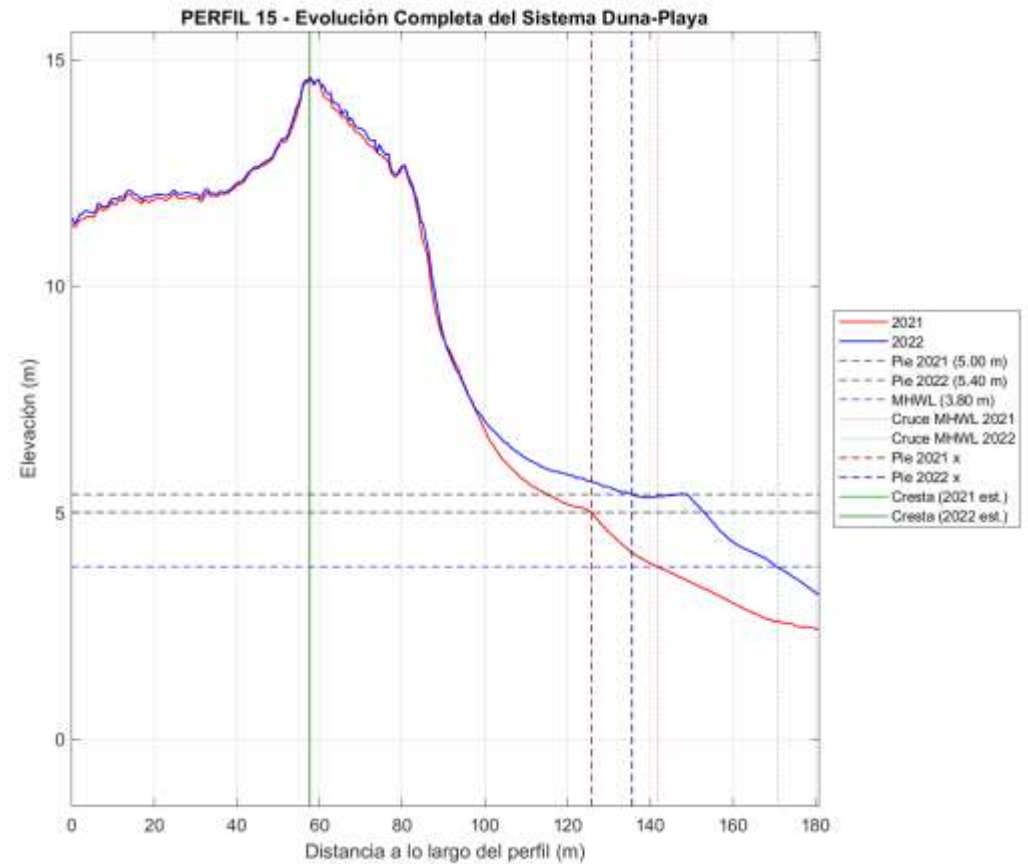
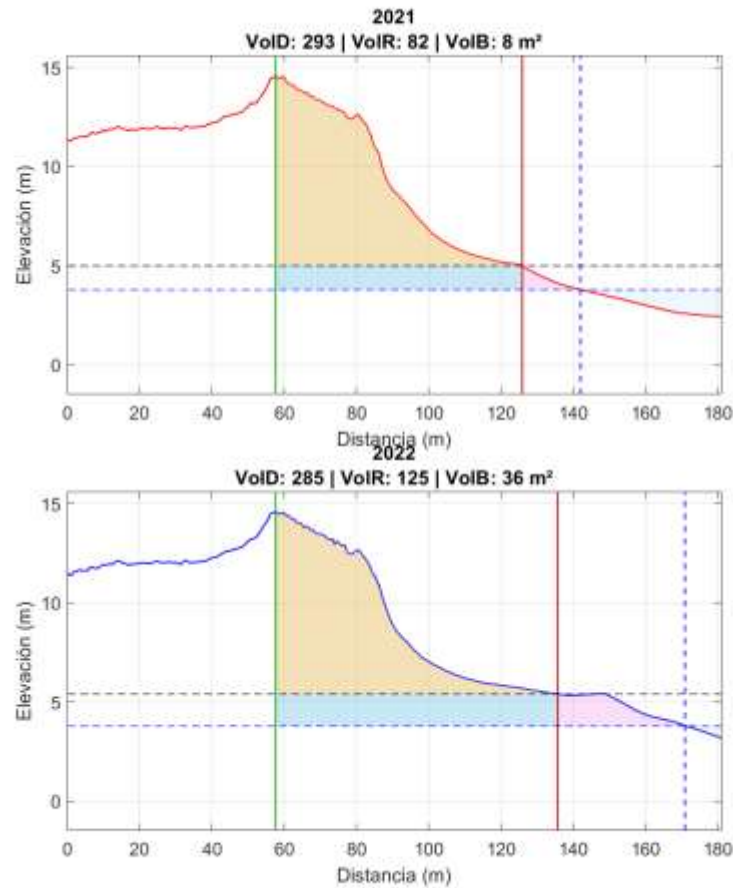


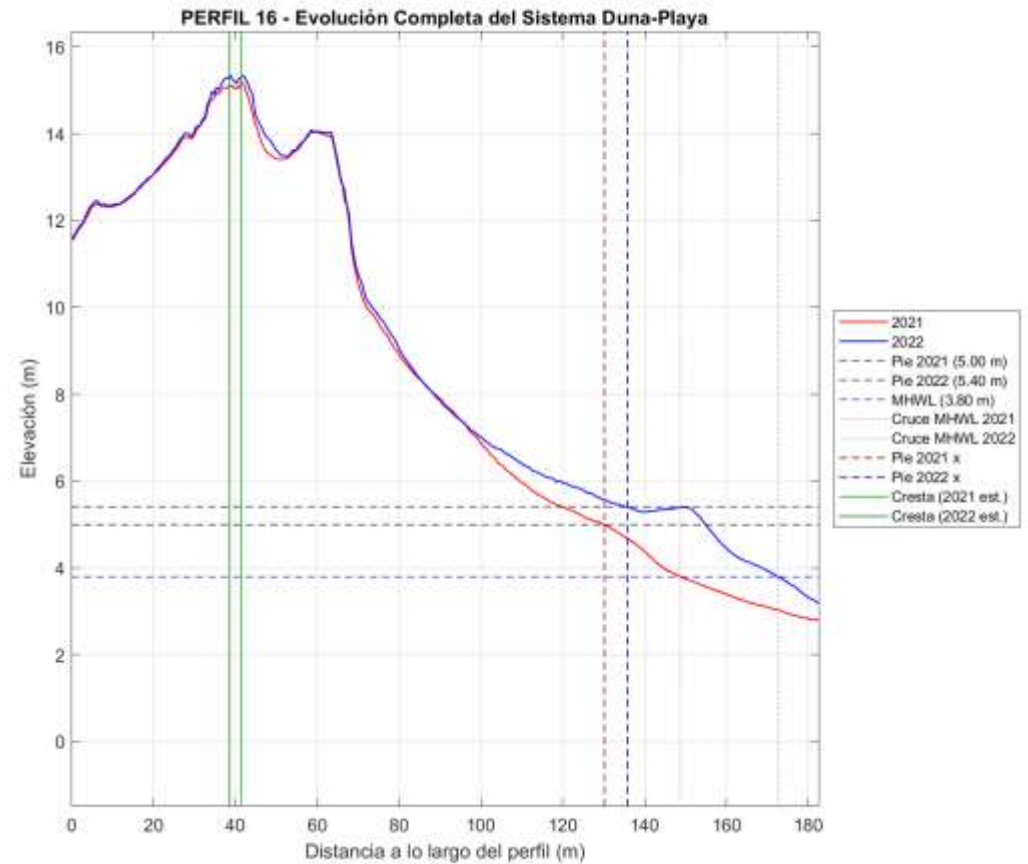
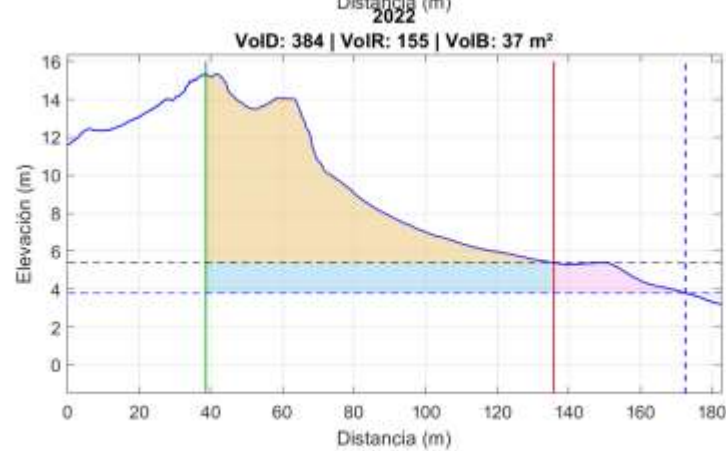
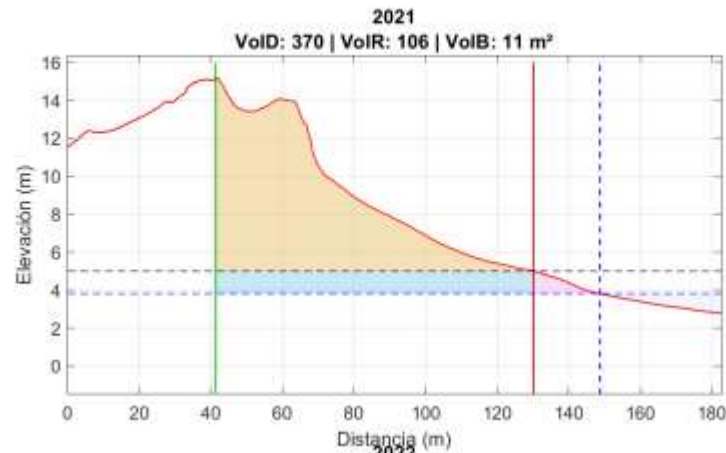


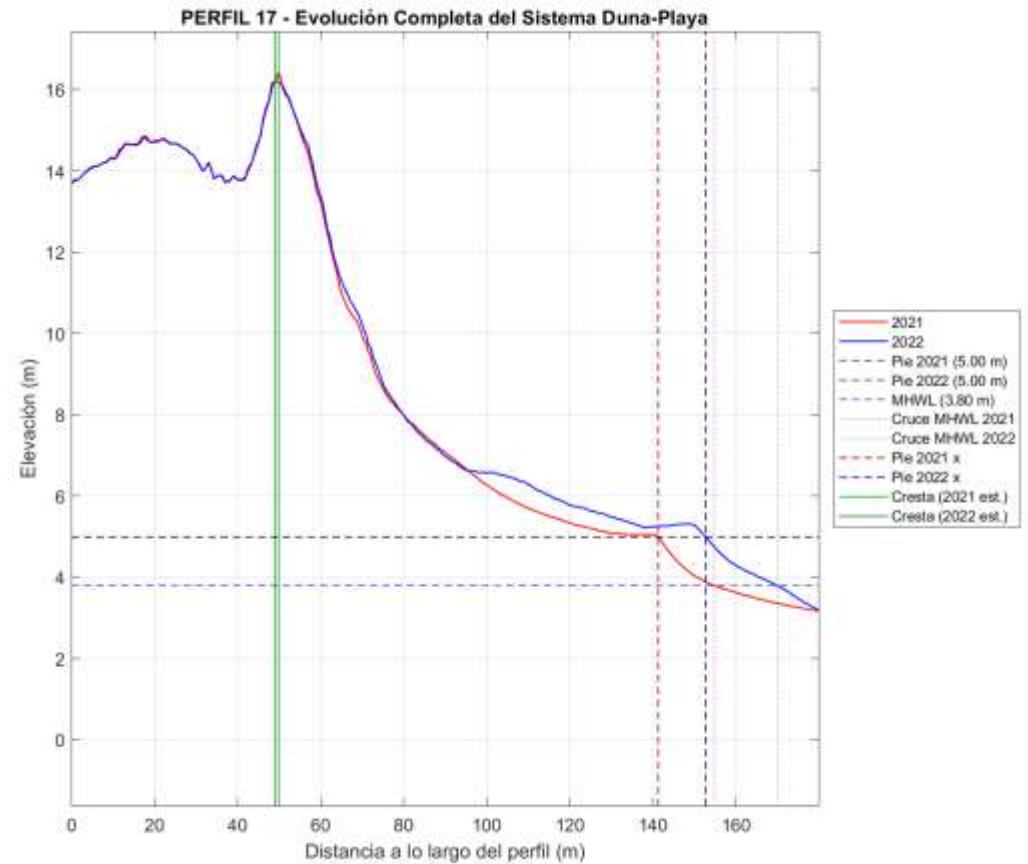
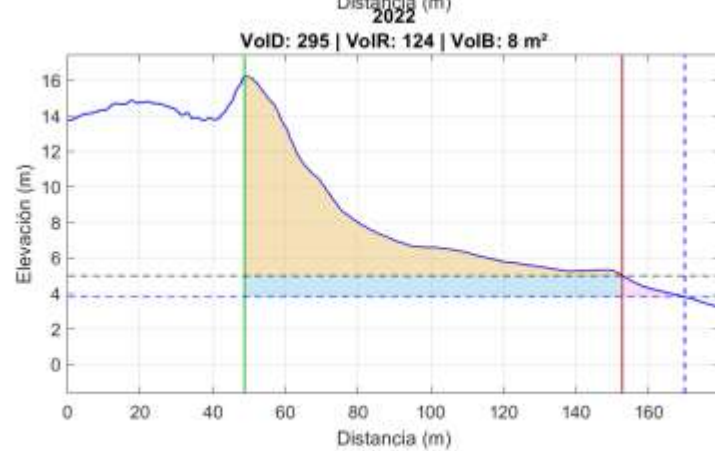
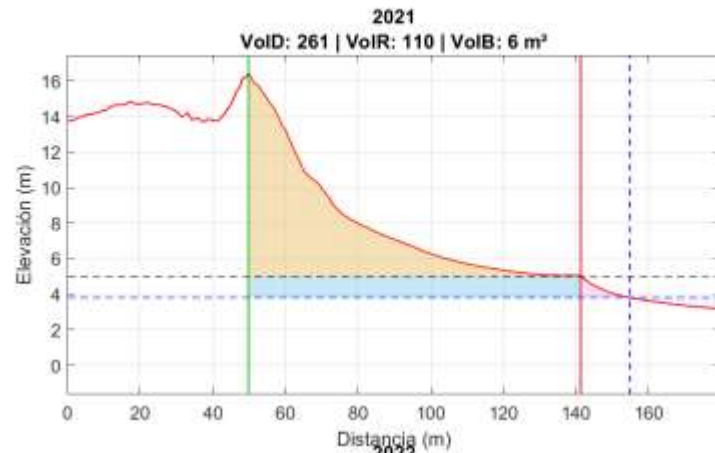


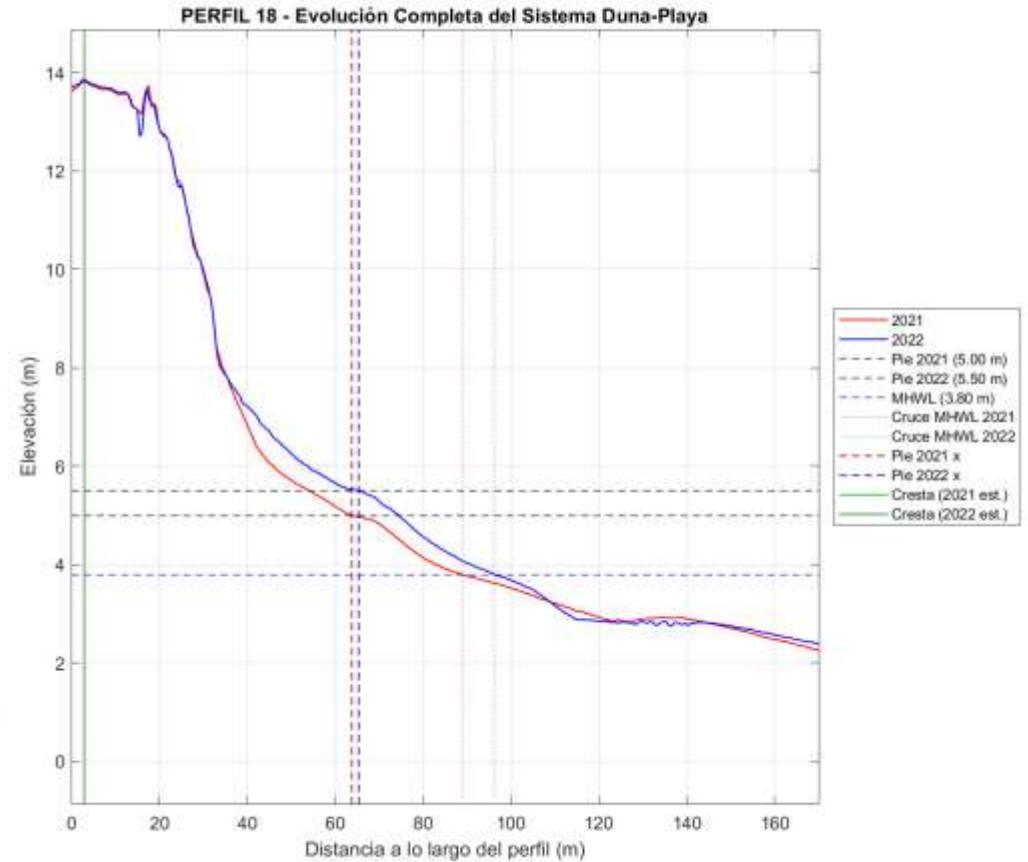
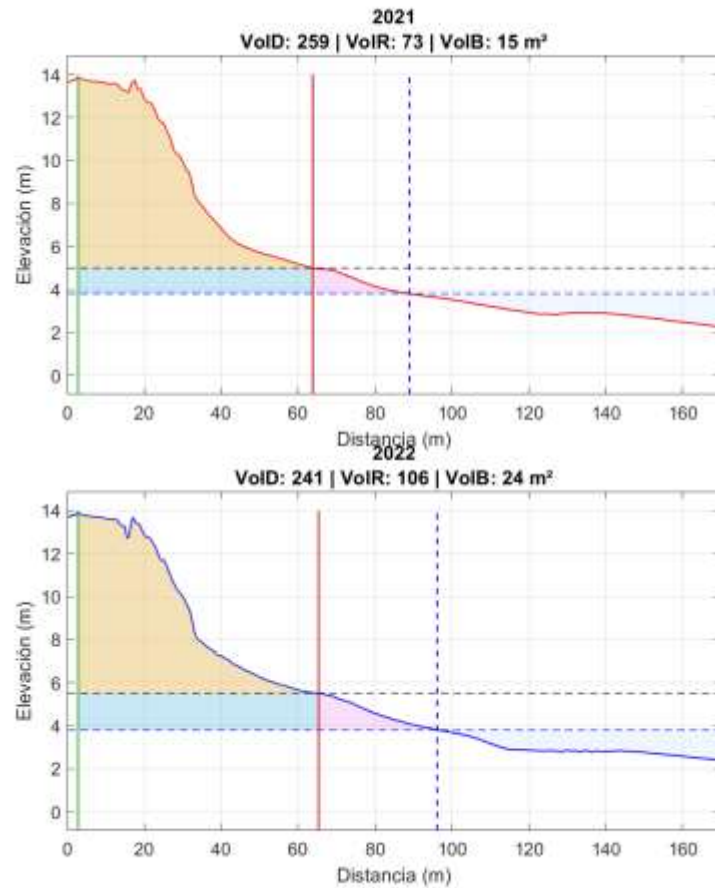
ESTUDIO DE EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DE PLAYAS EN AVILÉS

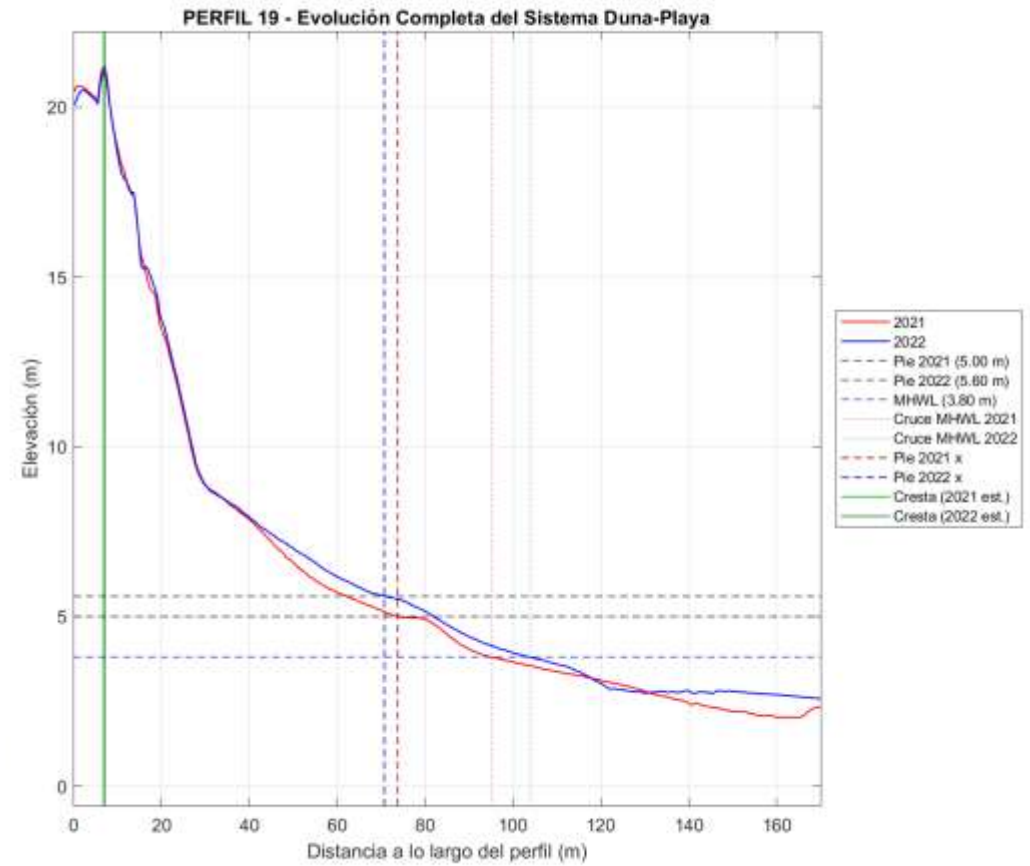
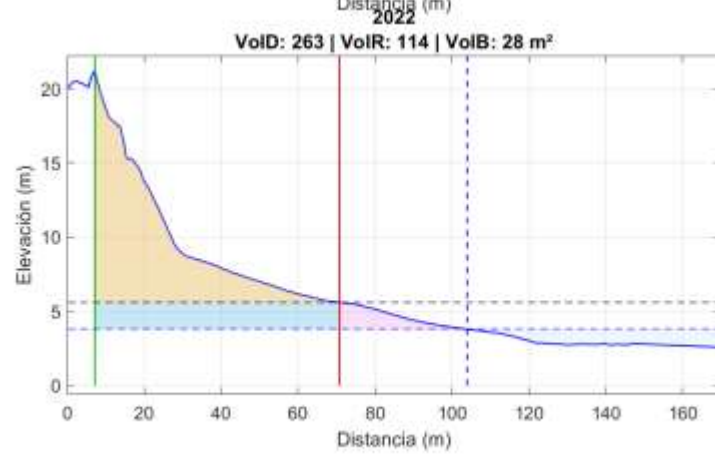
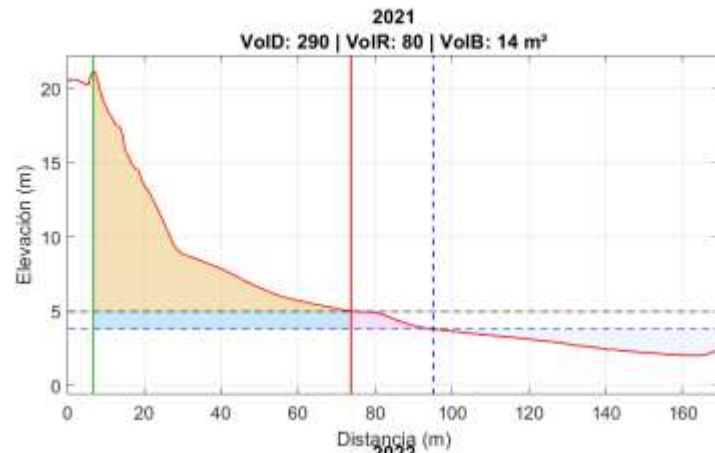


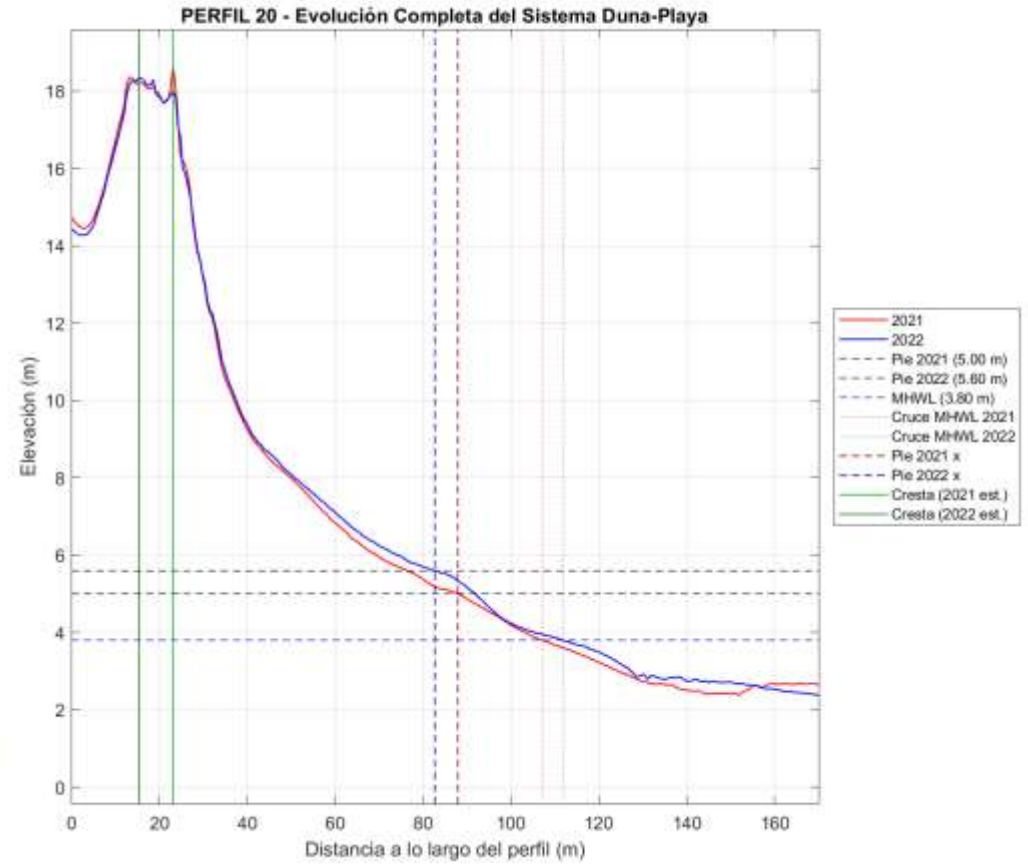
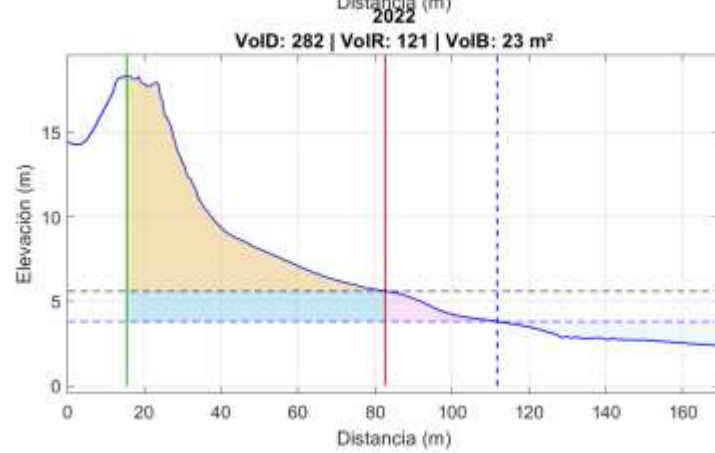
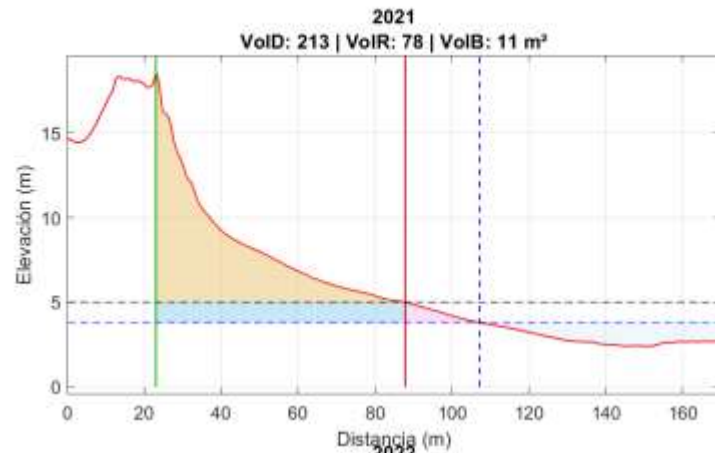


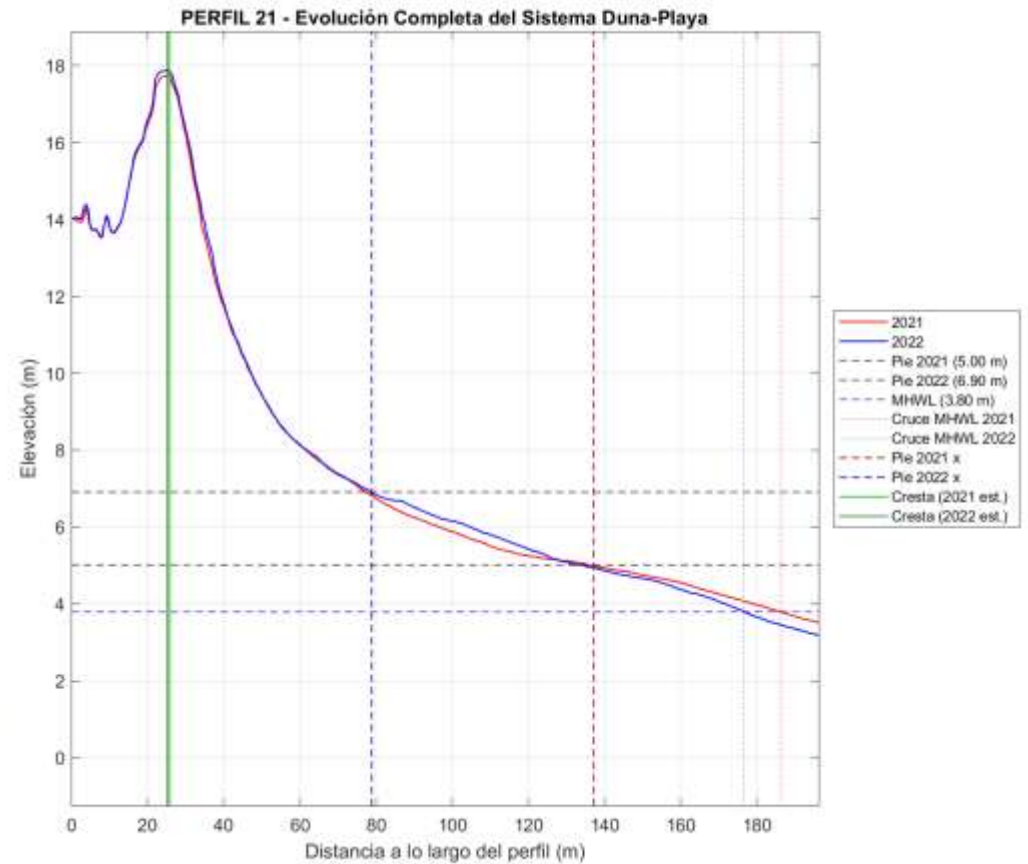
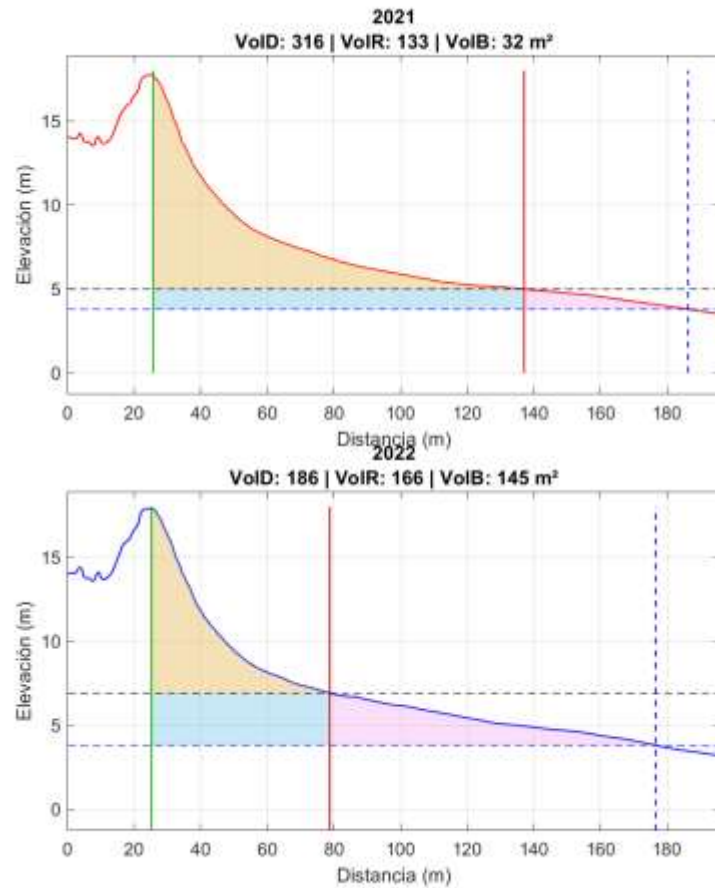


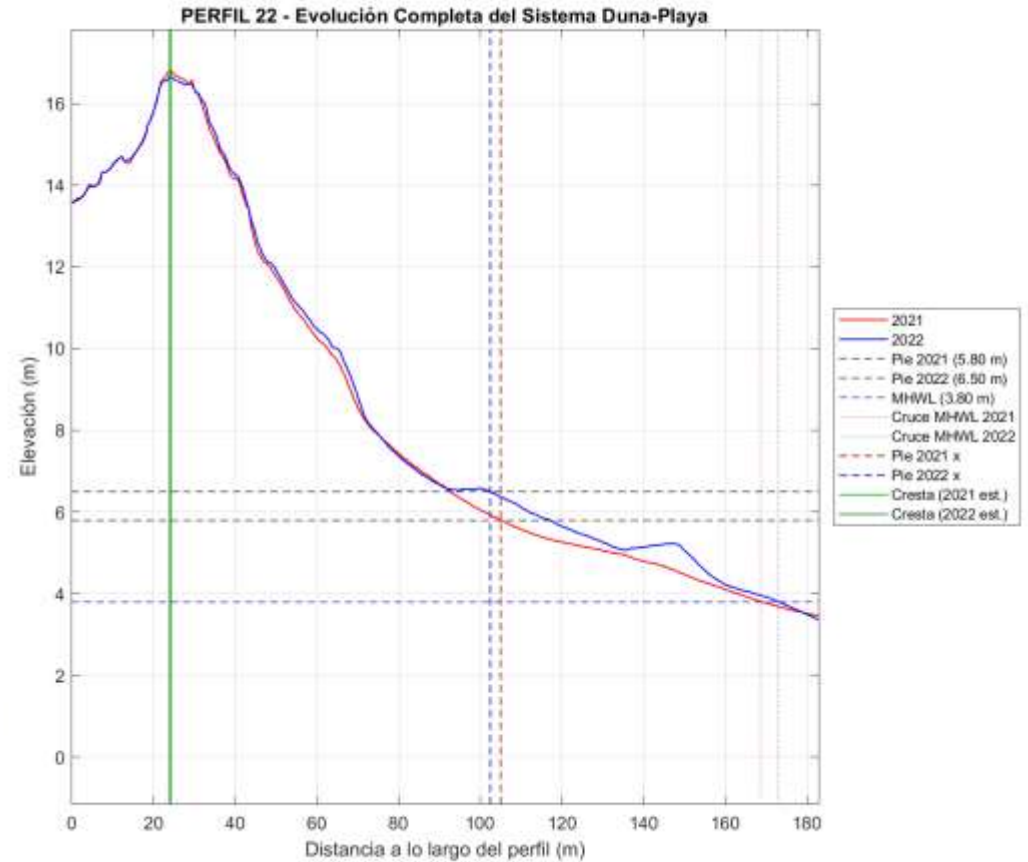
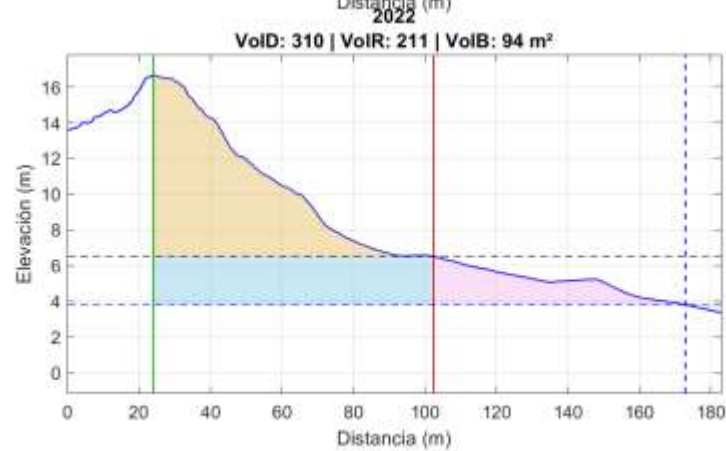
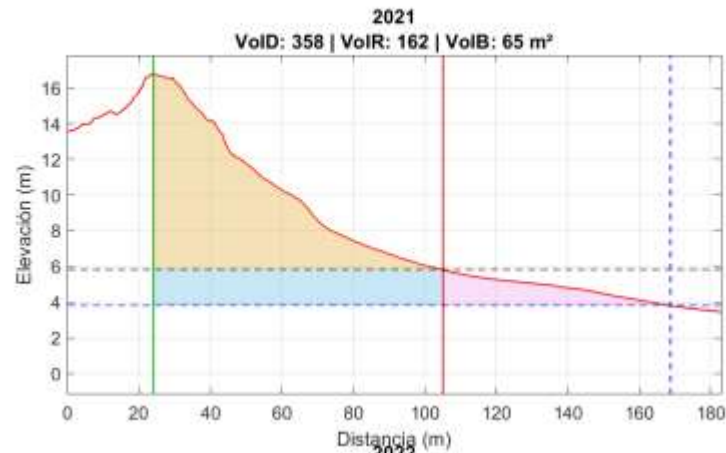




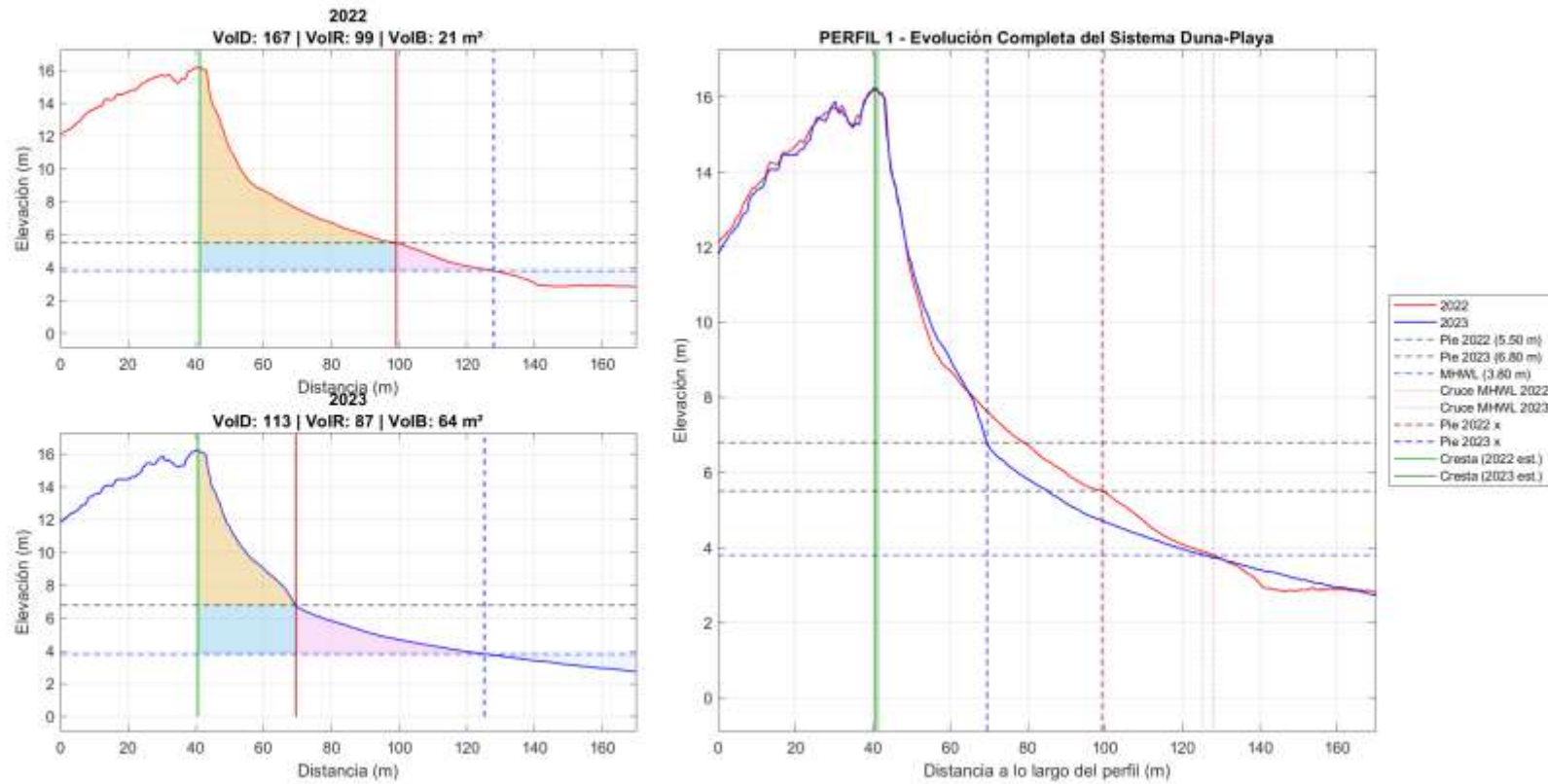


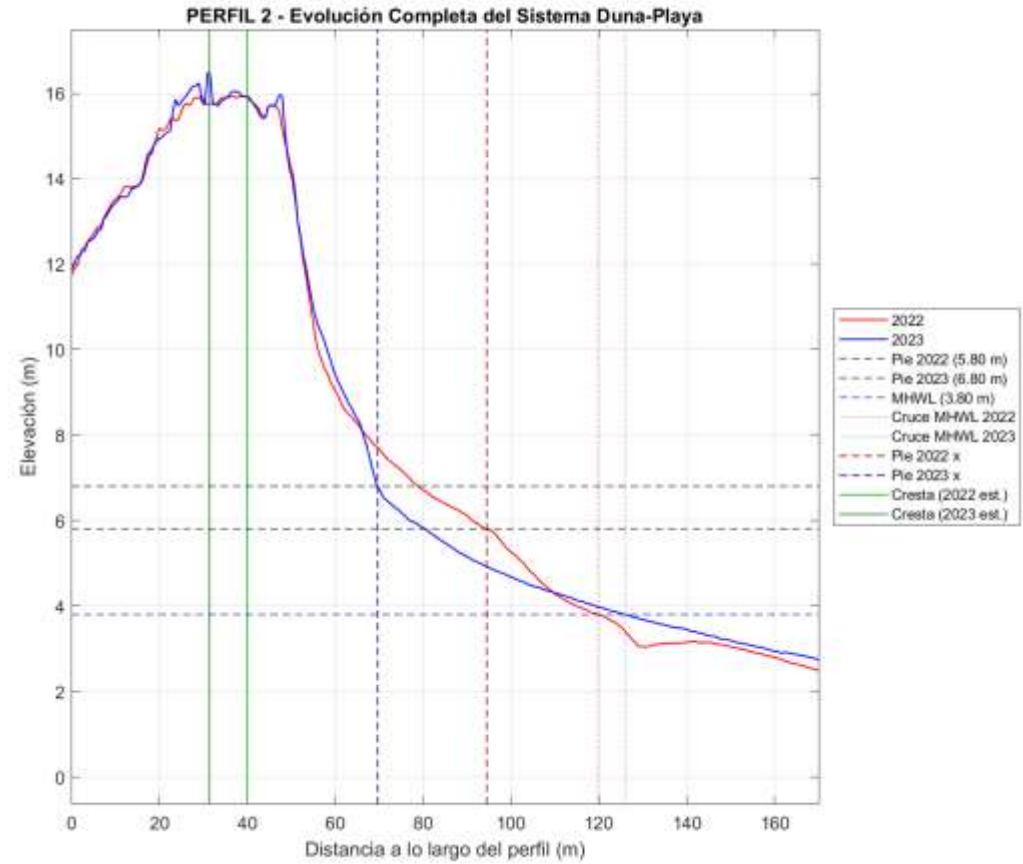
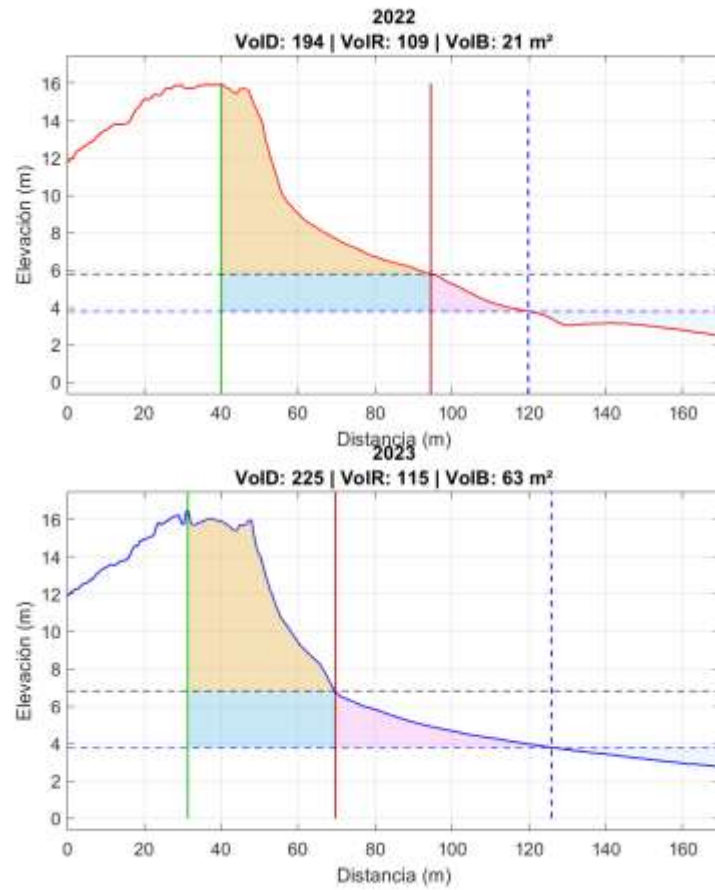


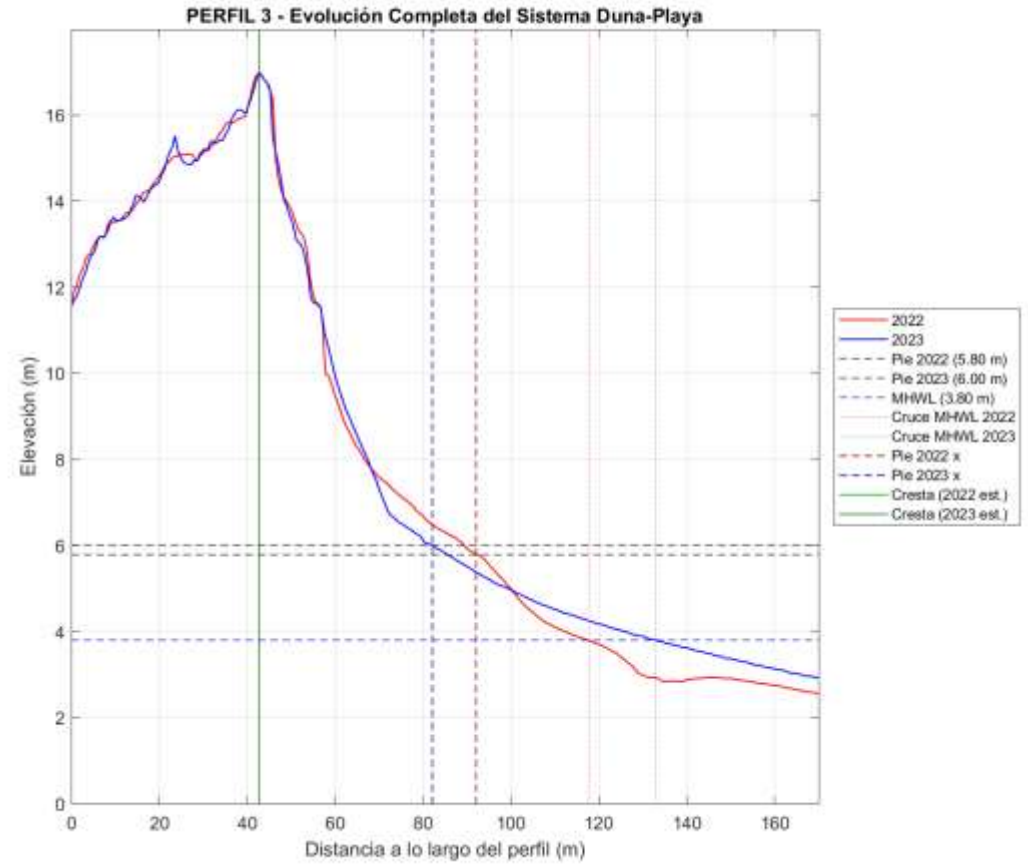
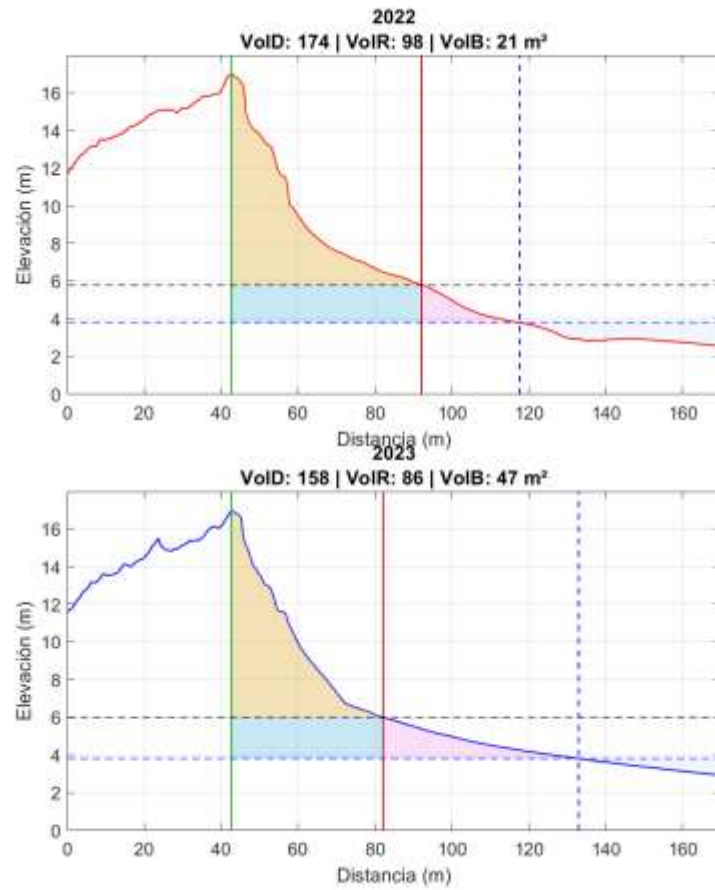


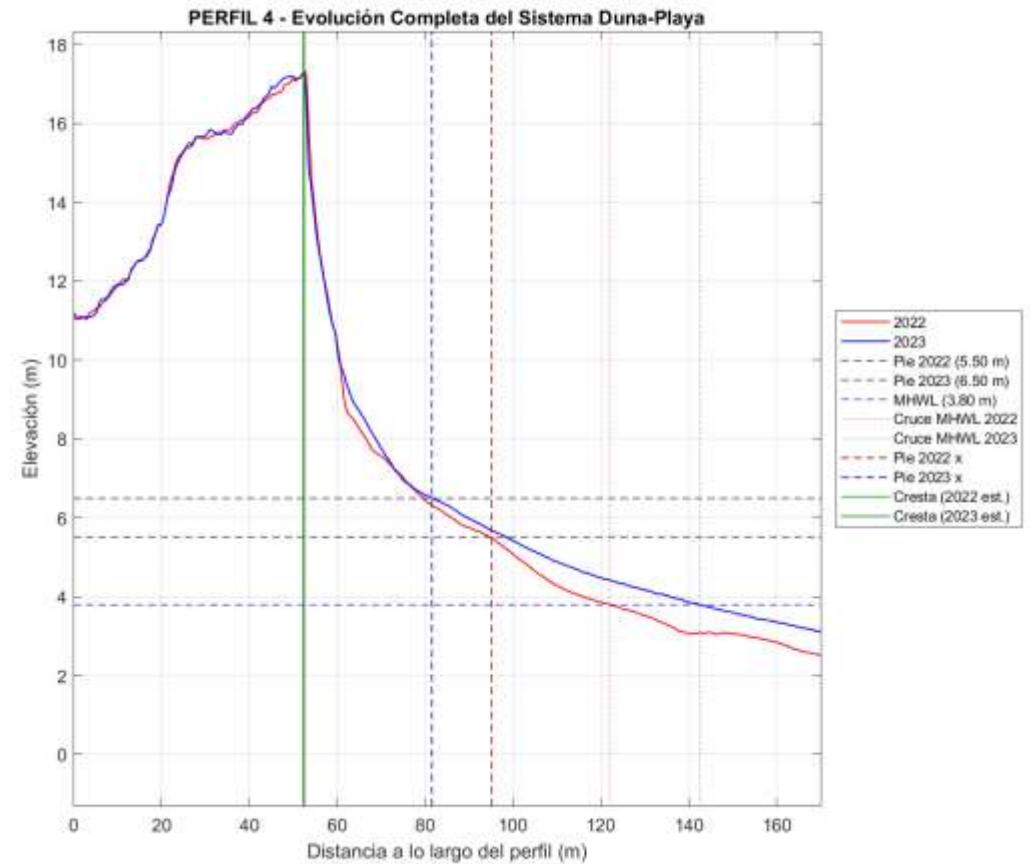
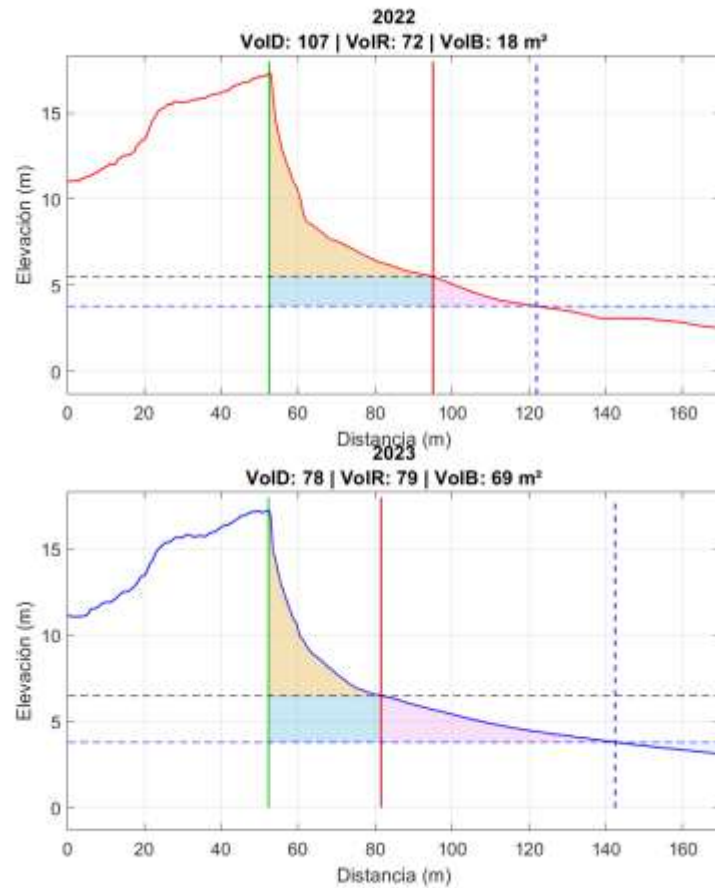


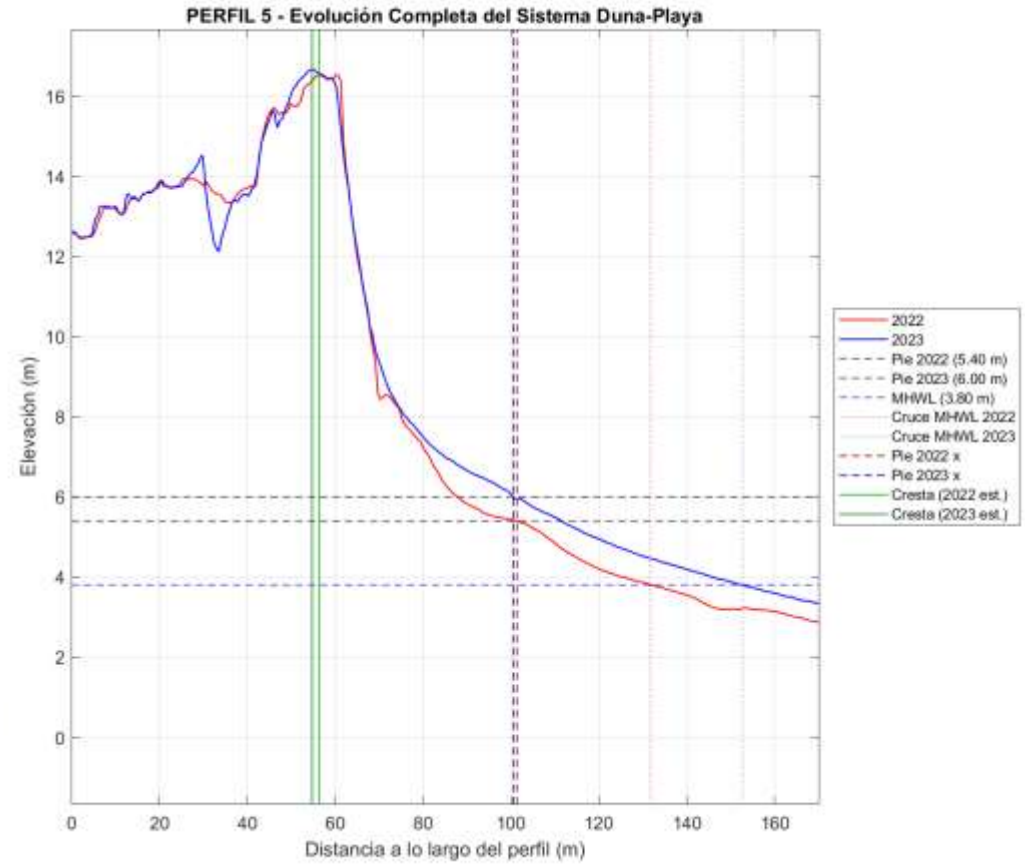
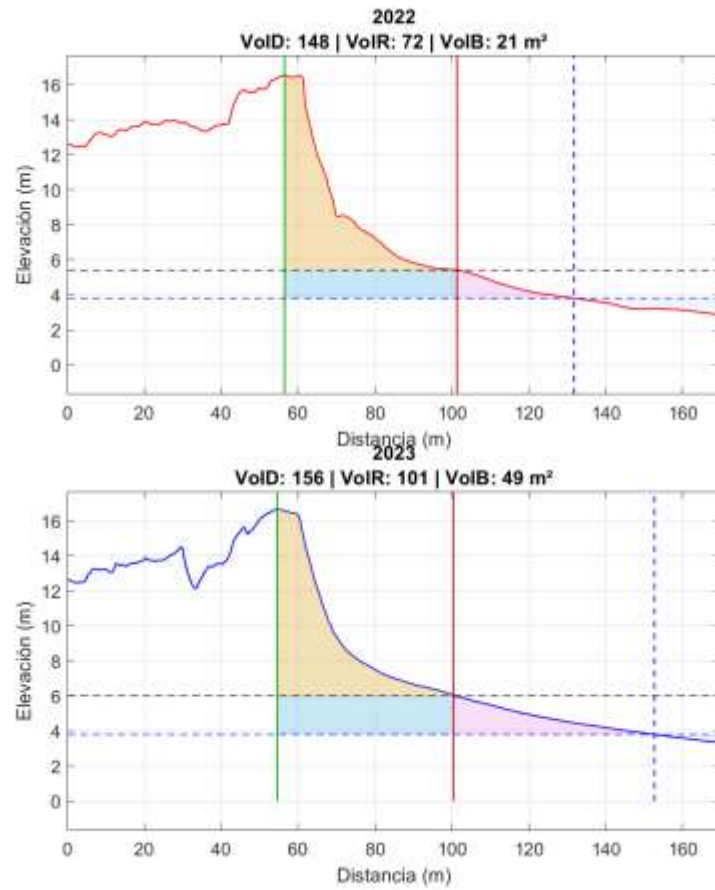
Perfiles 2022-2023

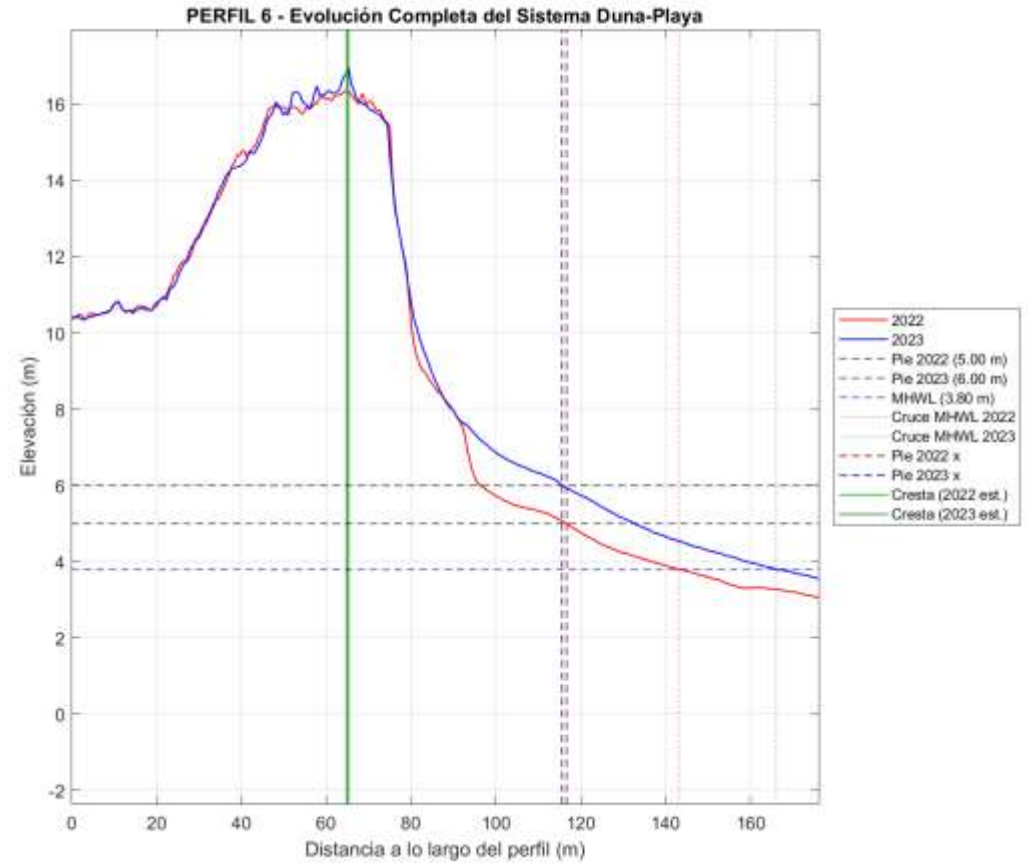
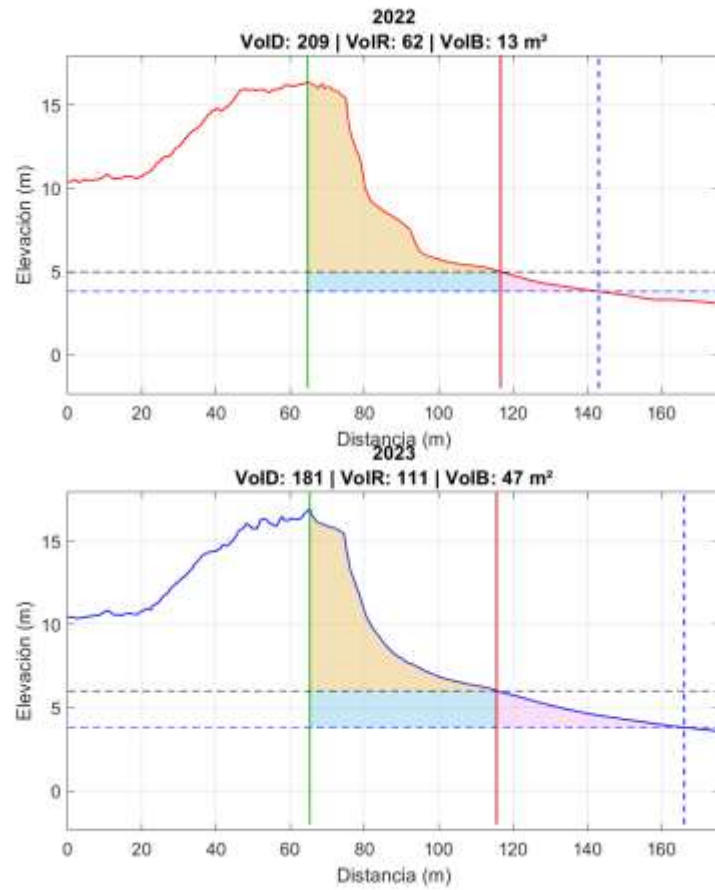


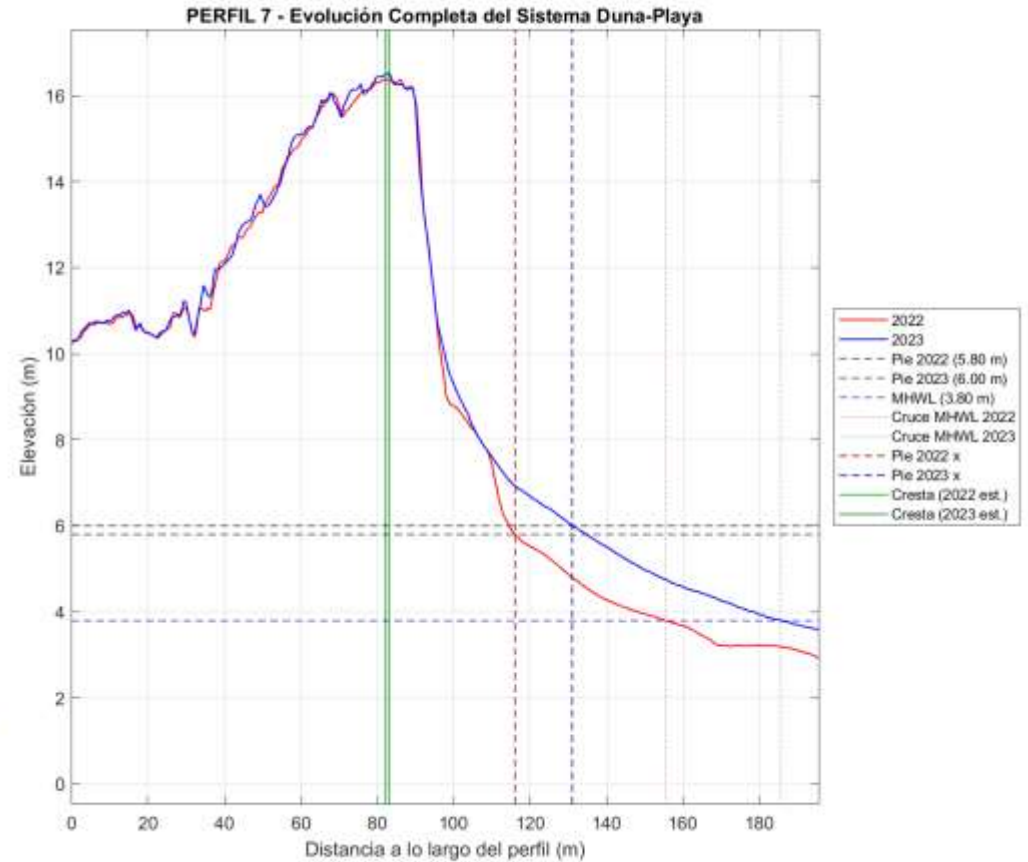
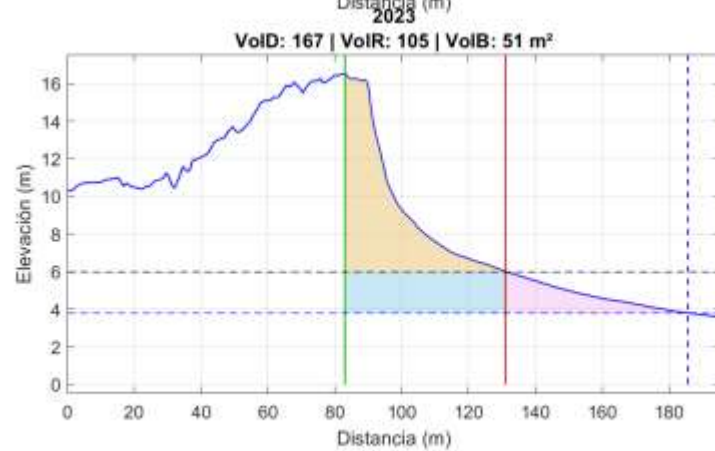
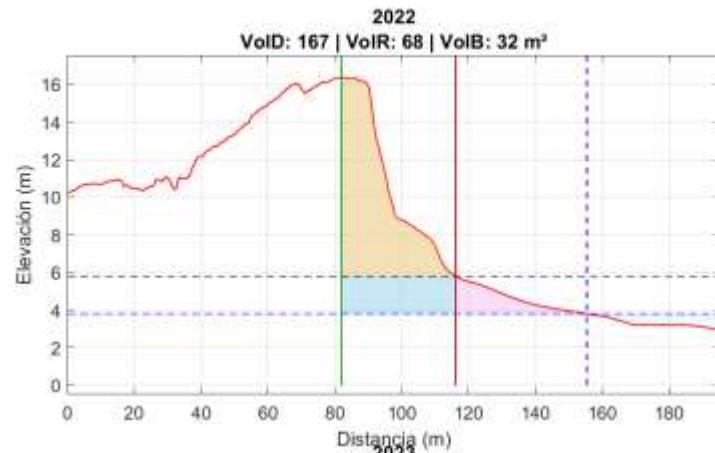


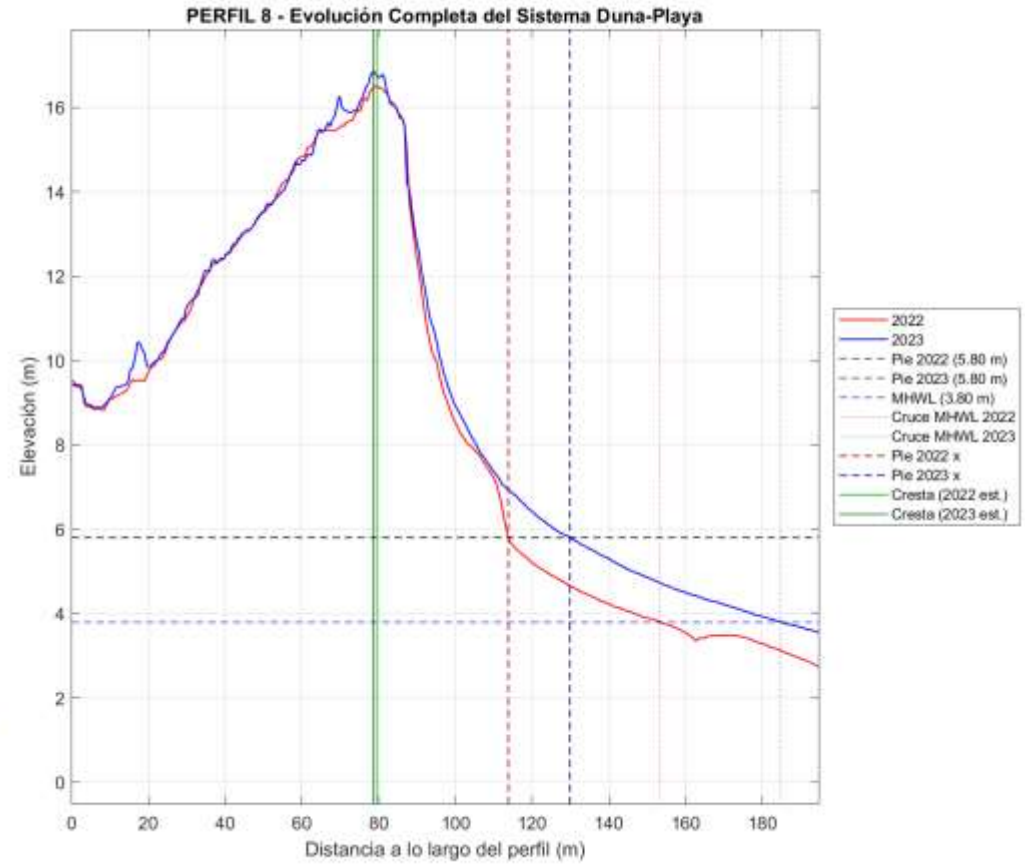
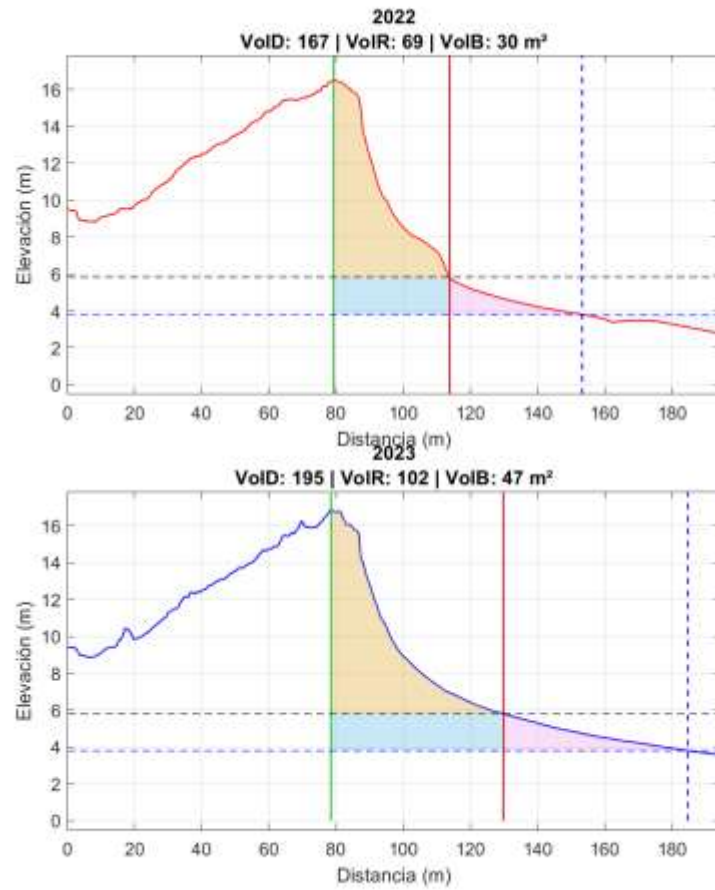


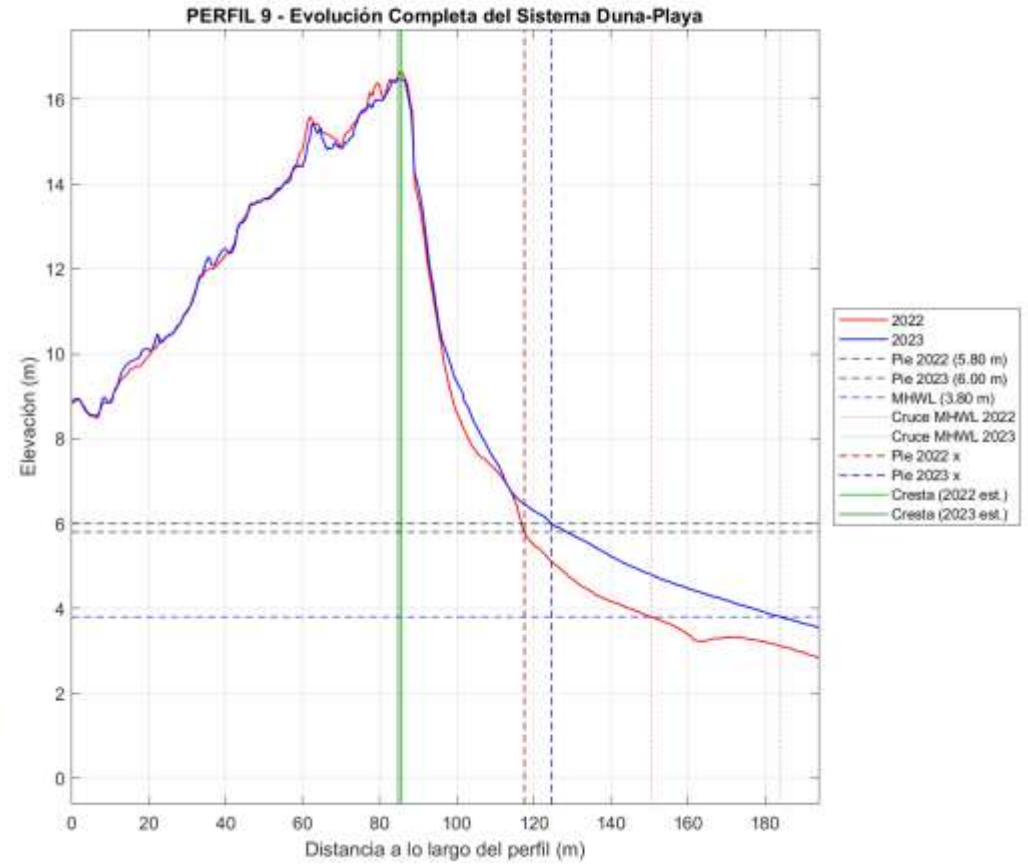
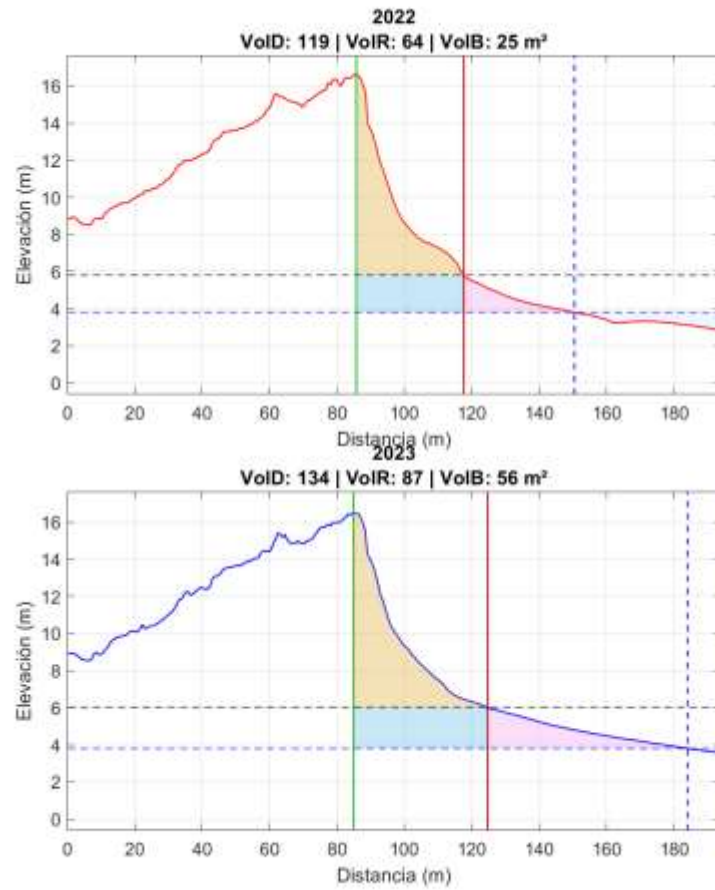


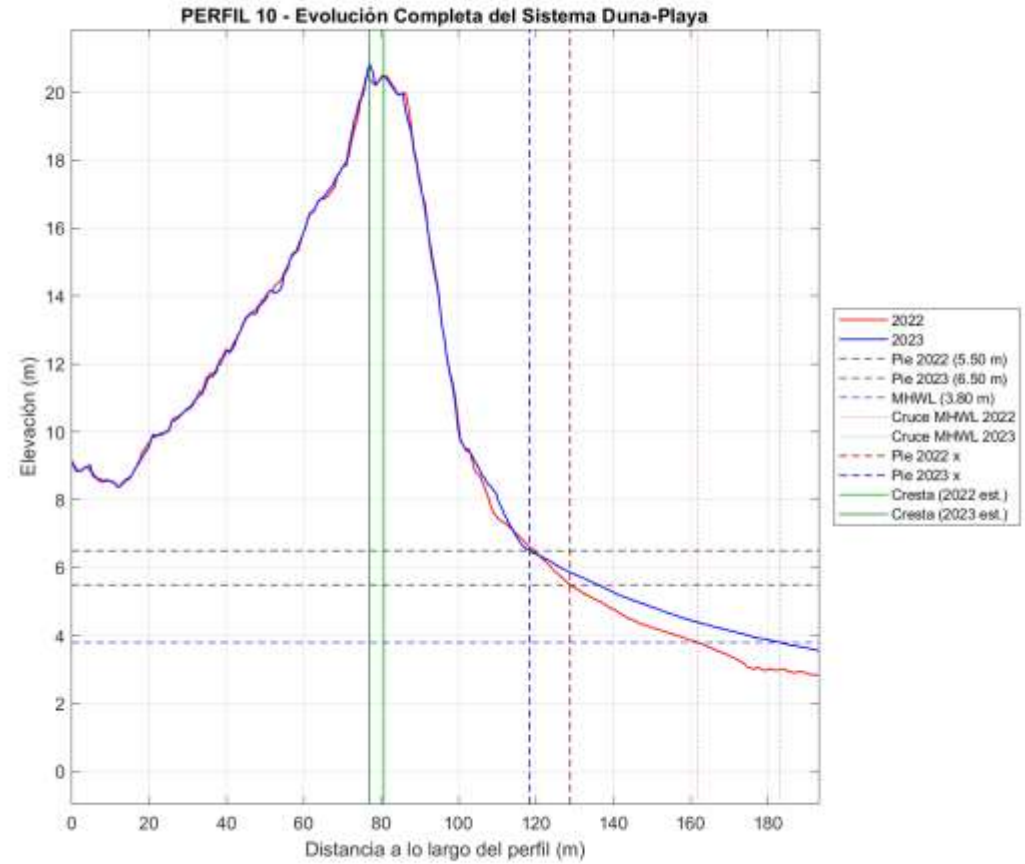
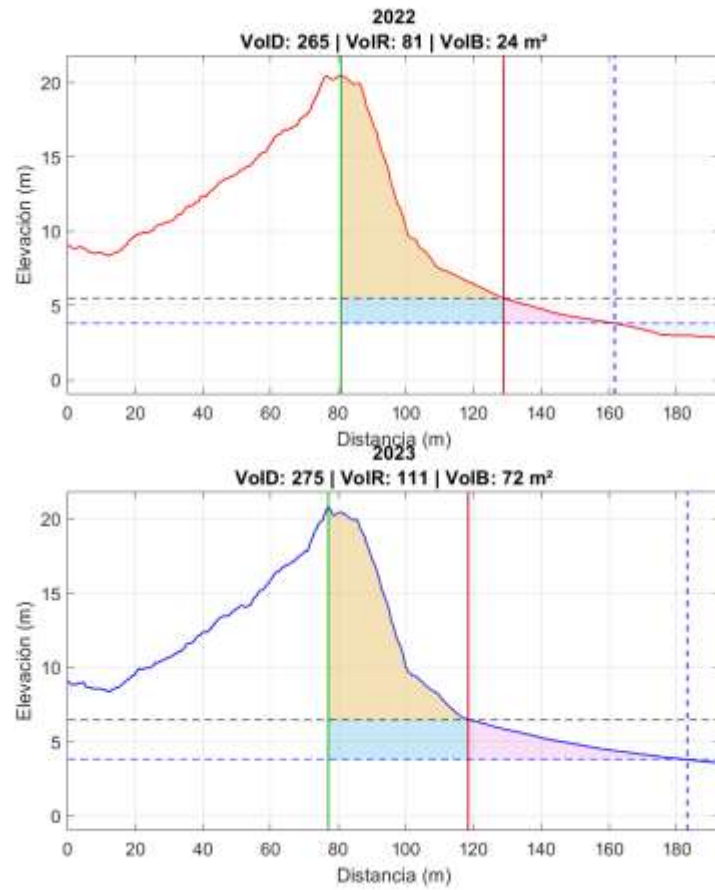


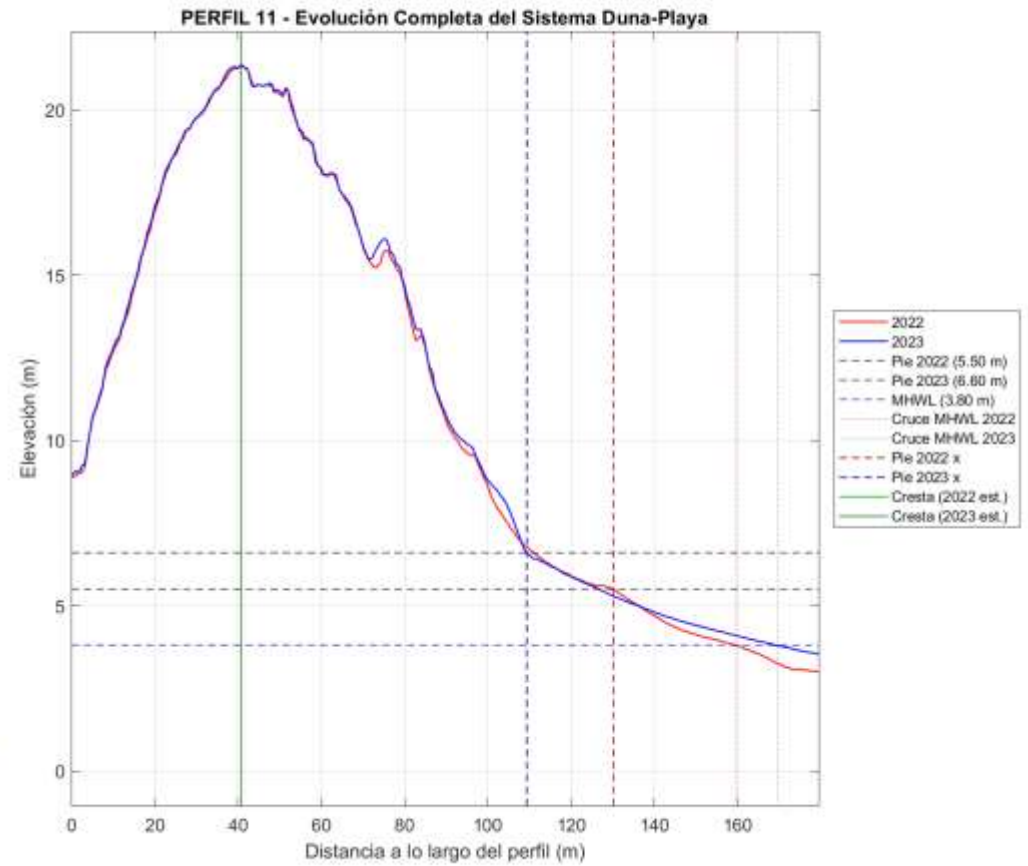
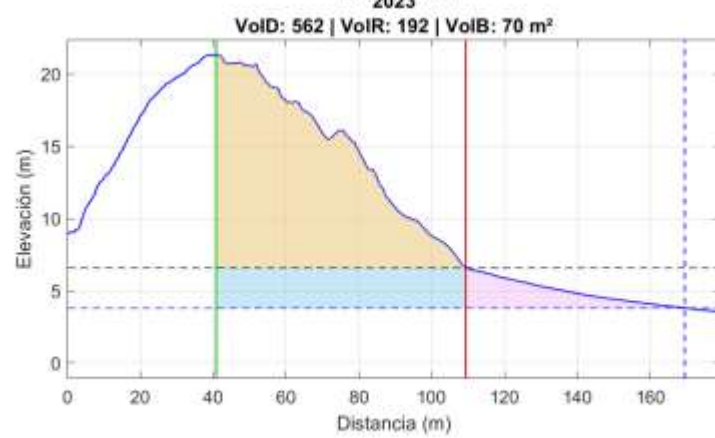
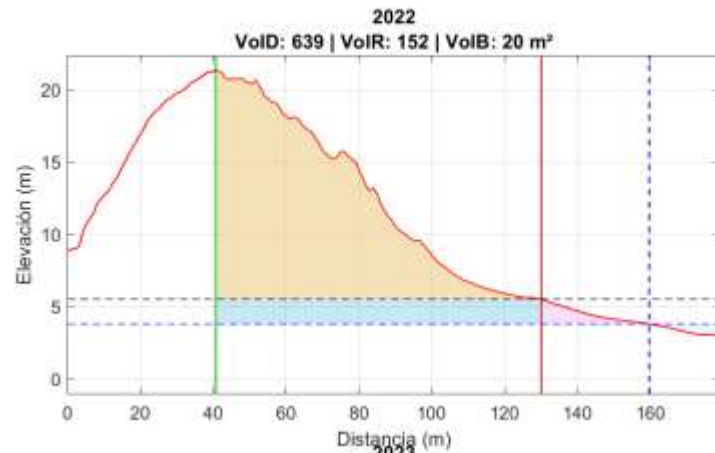


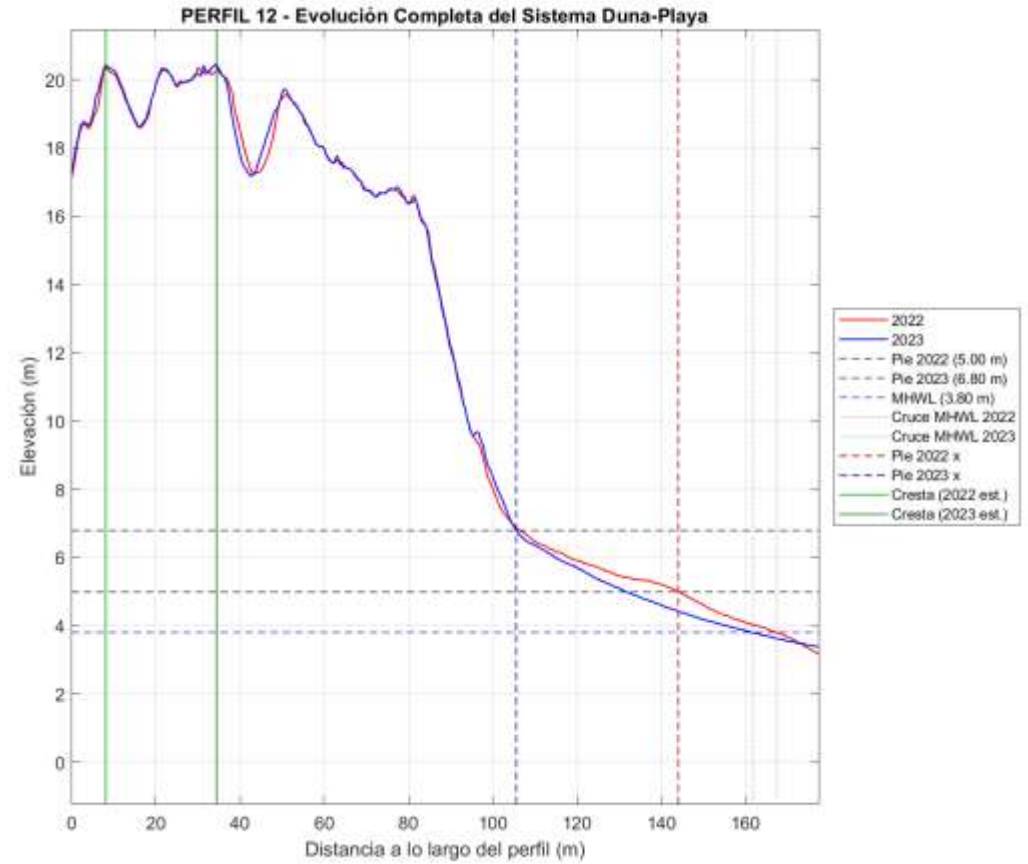
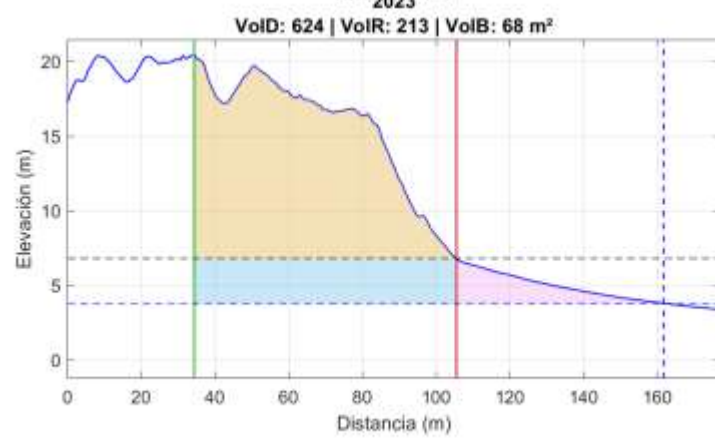
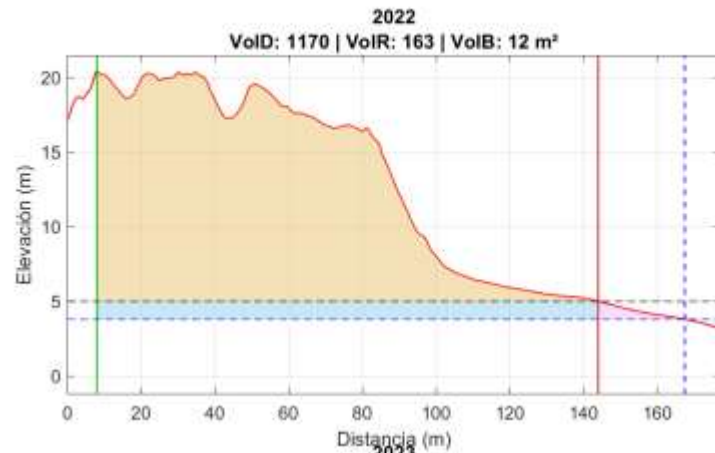


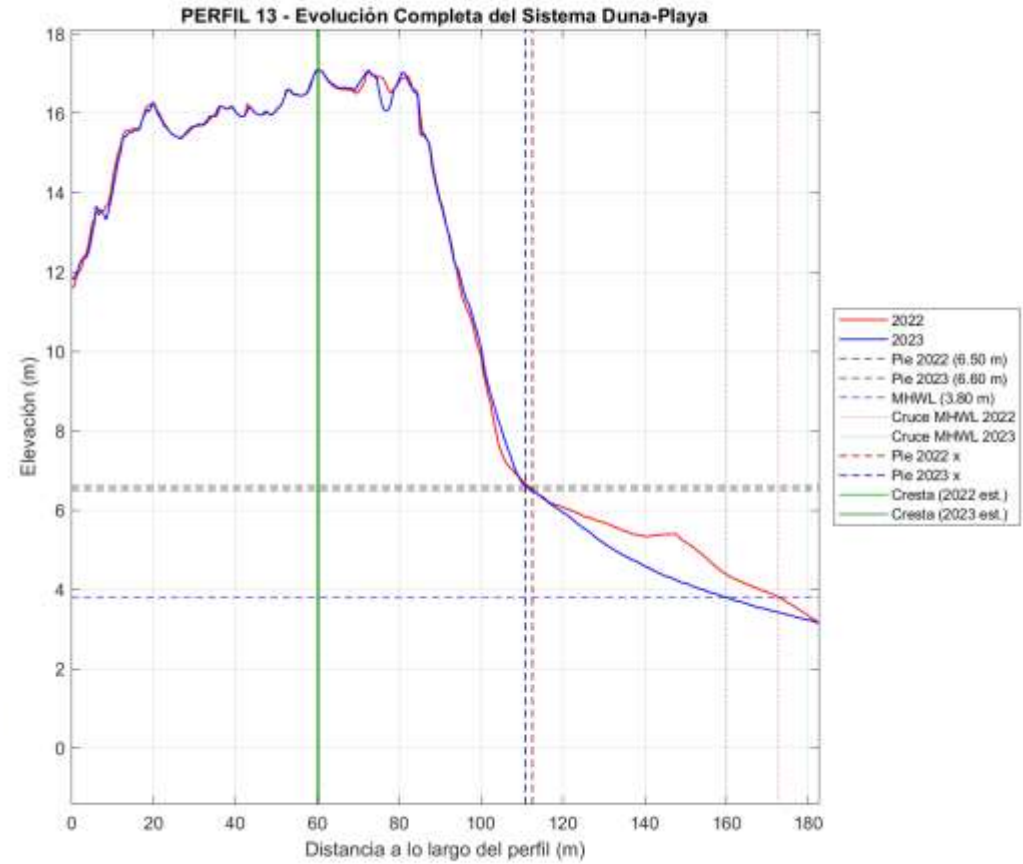
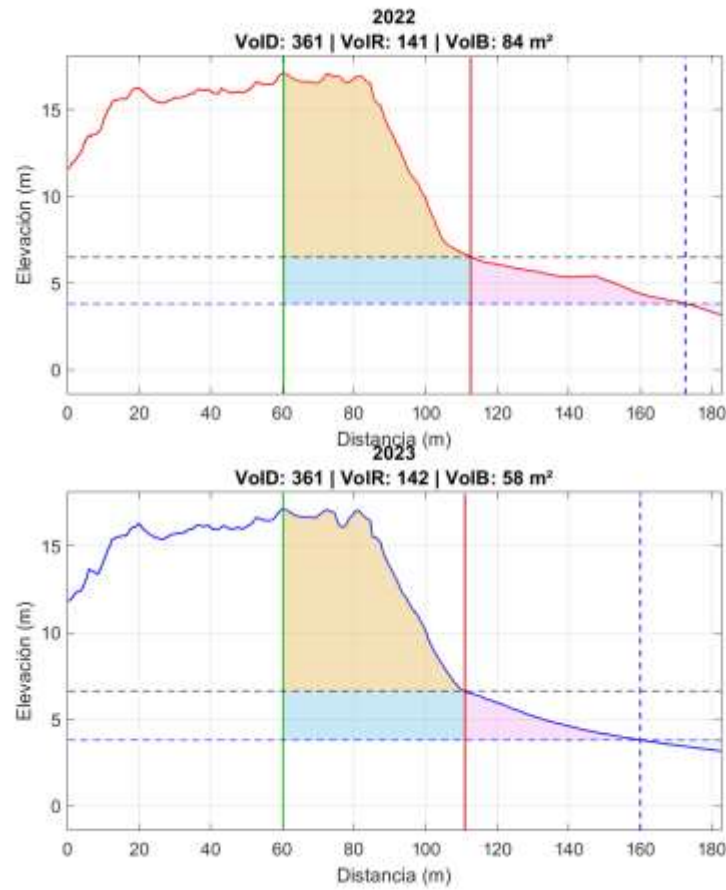


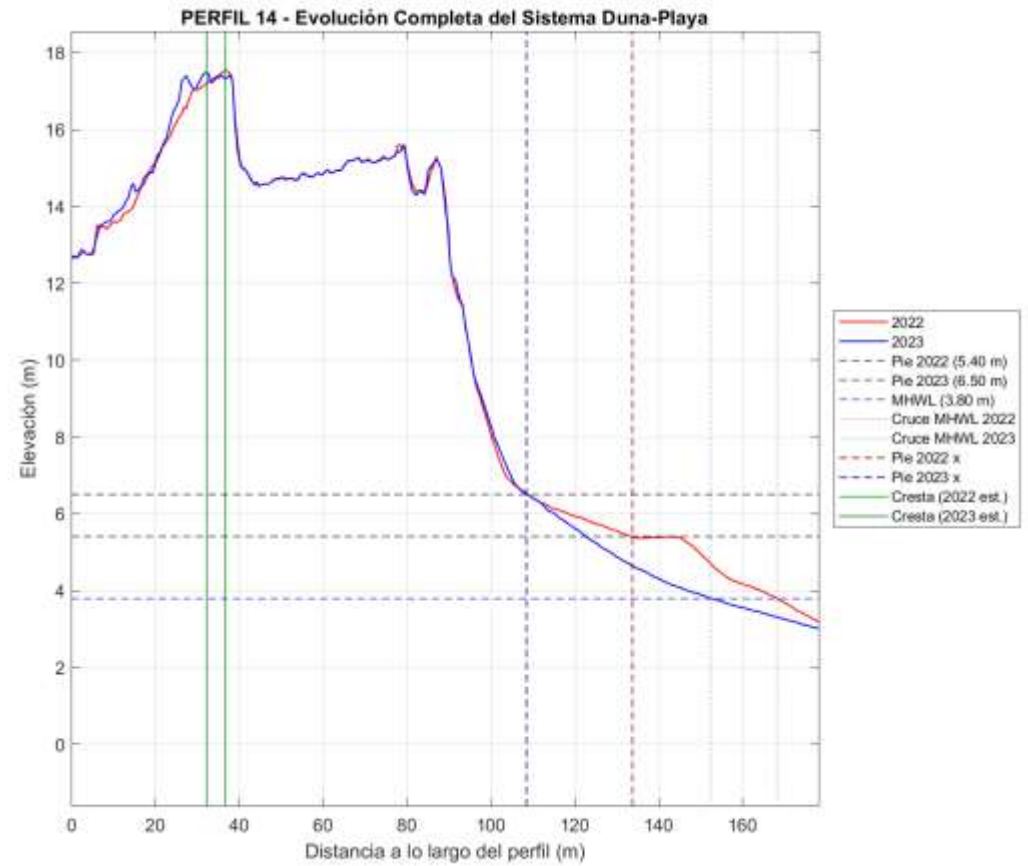
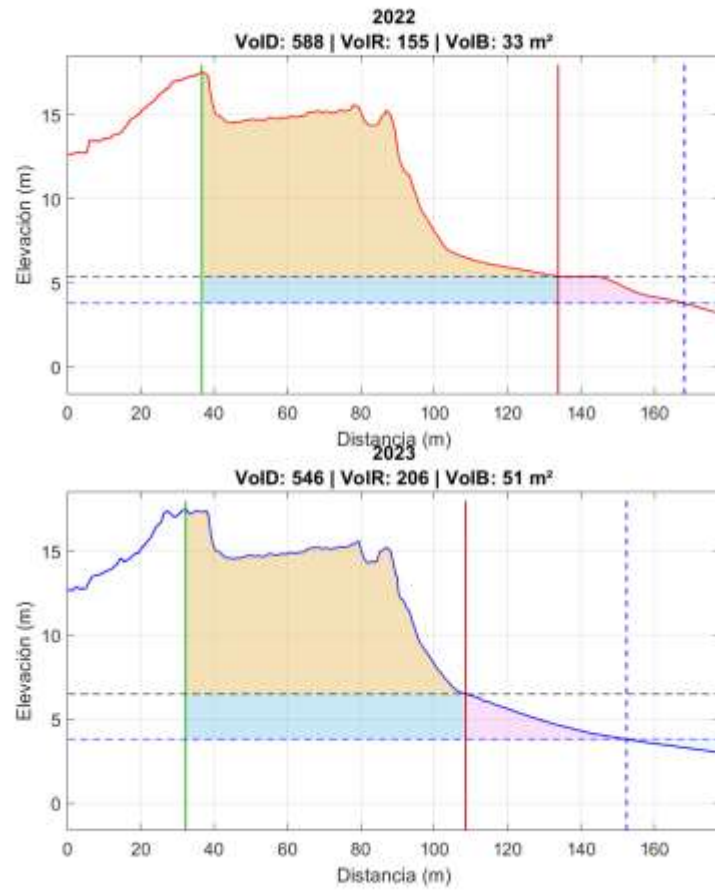


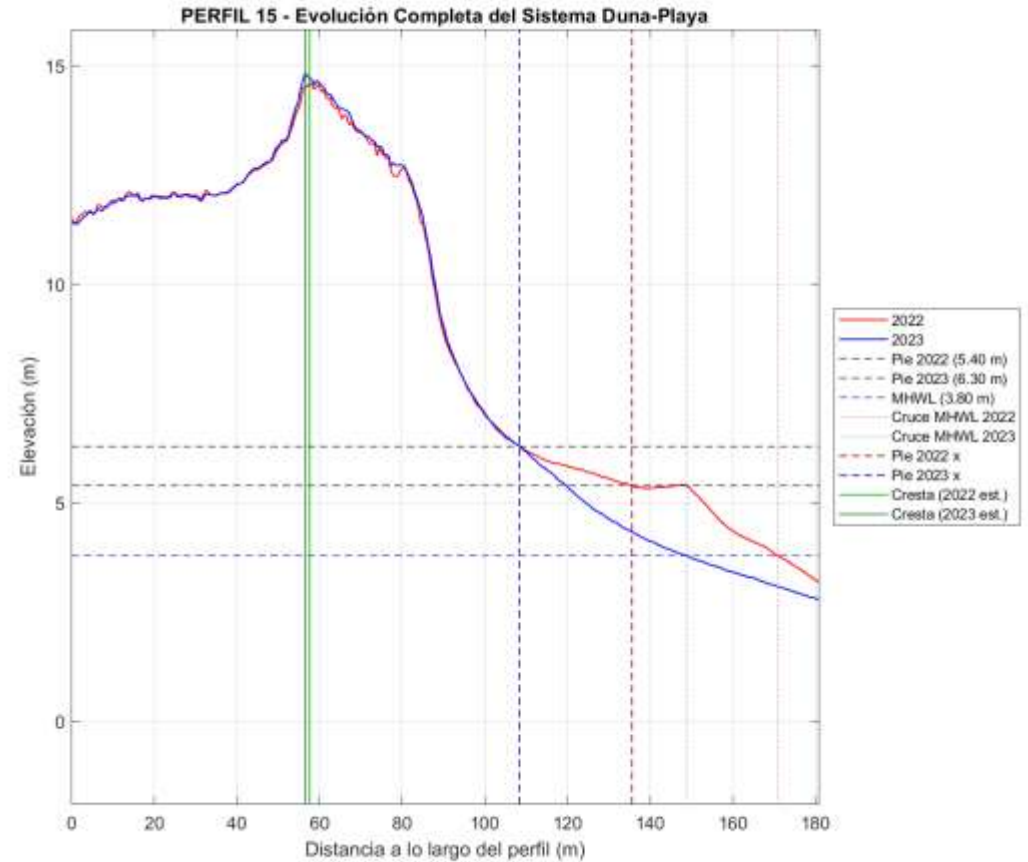
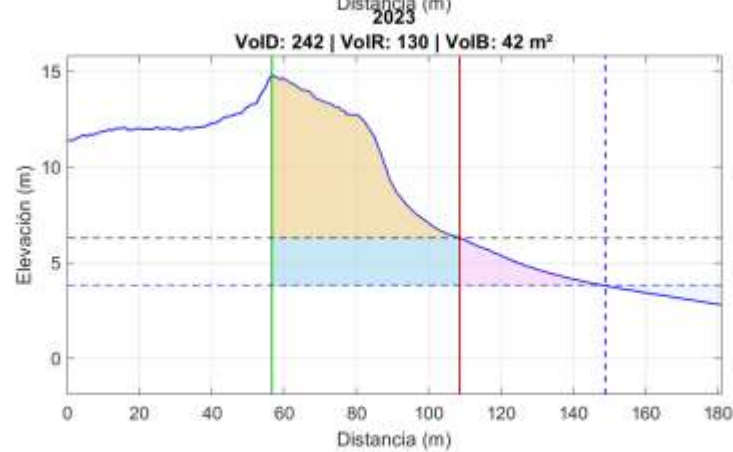
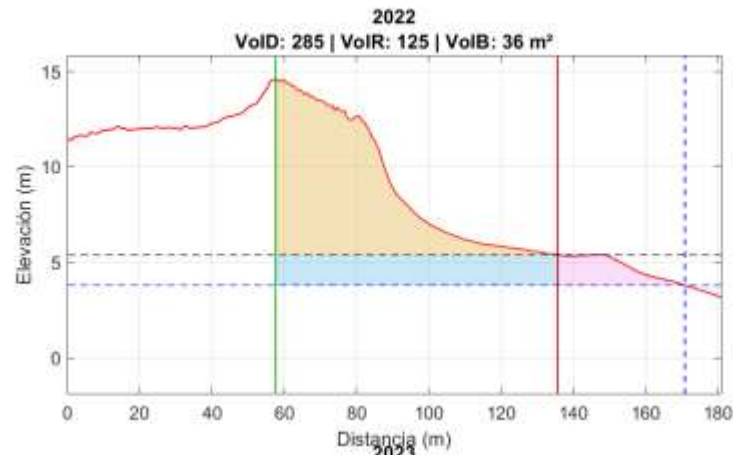


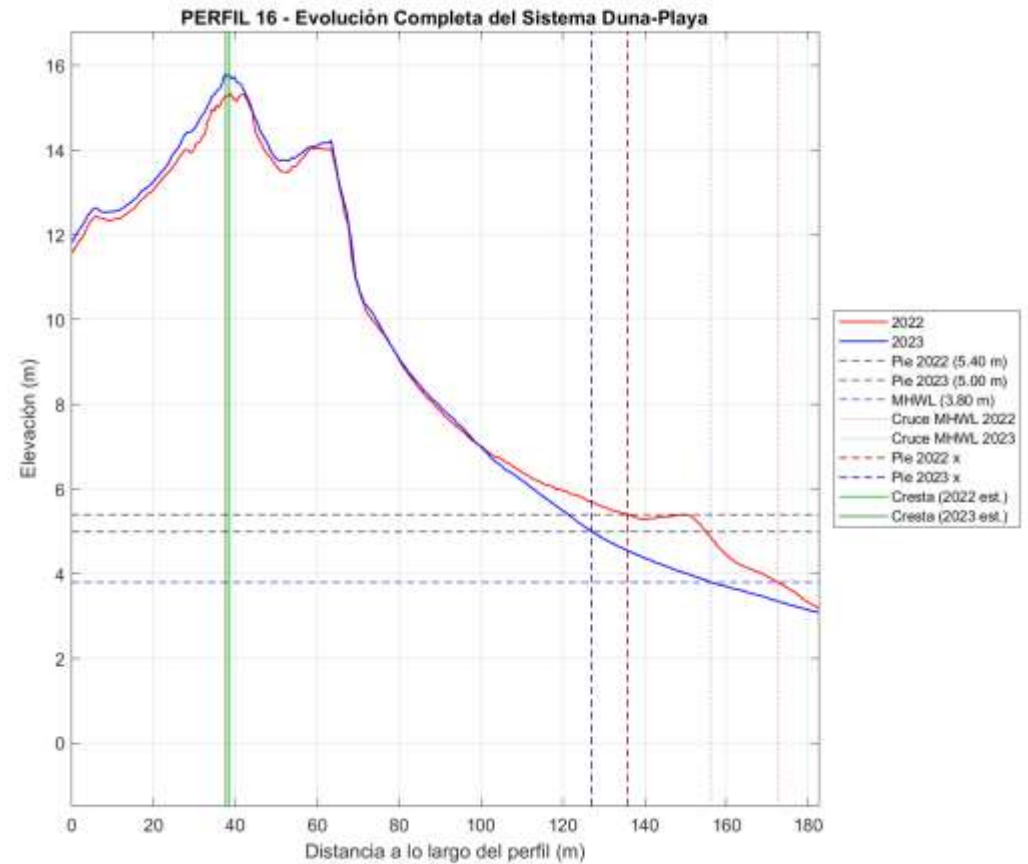
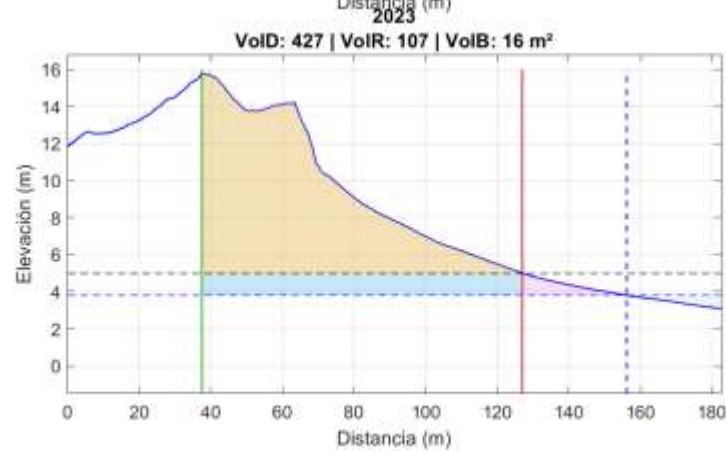
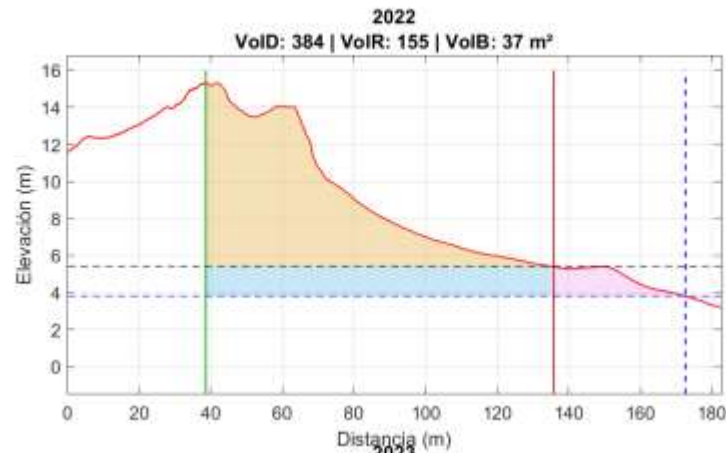


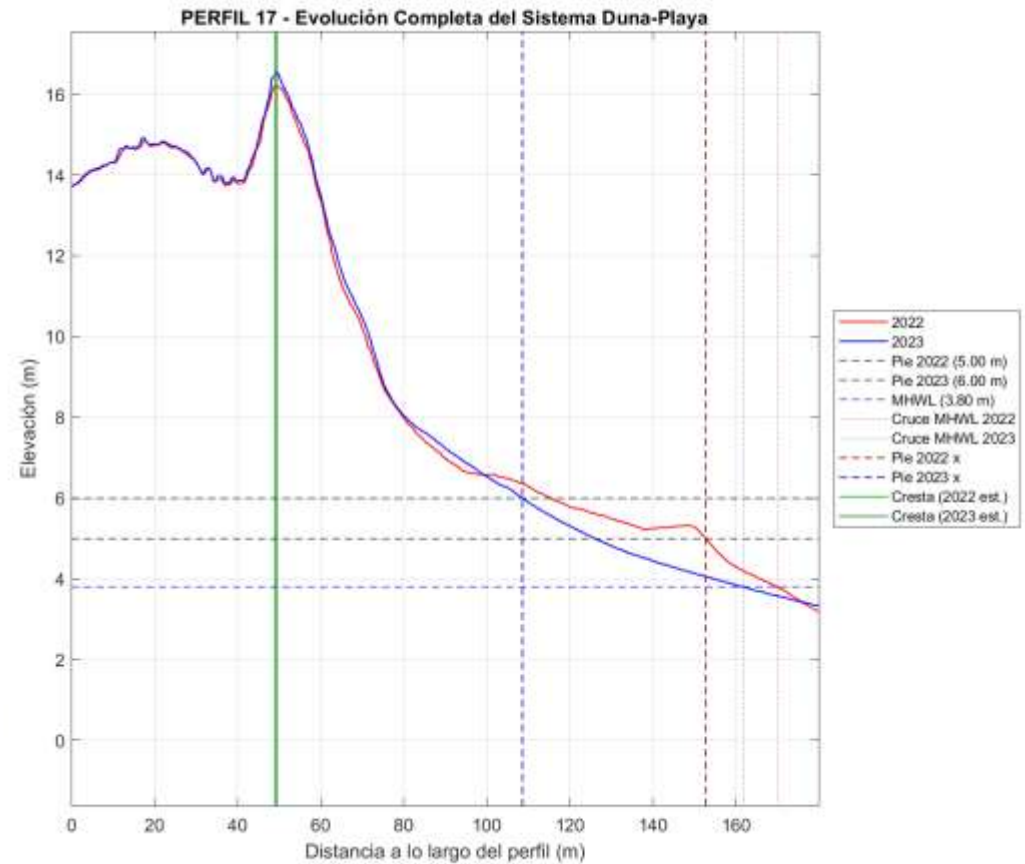
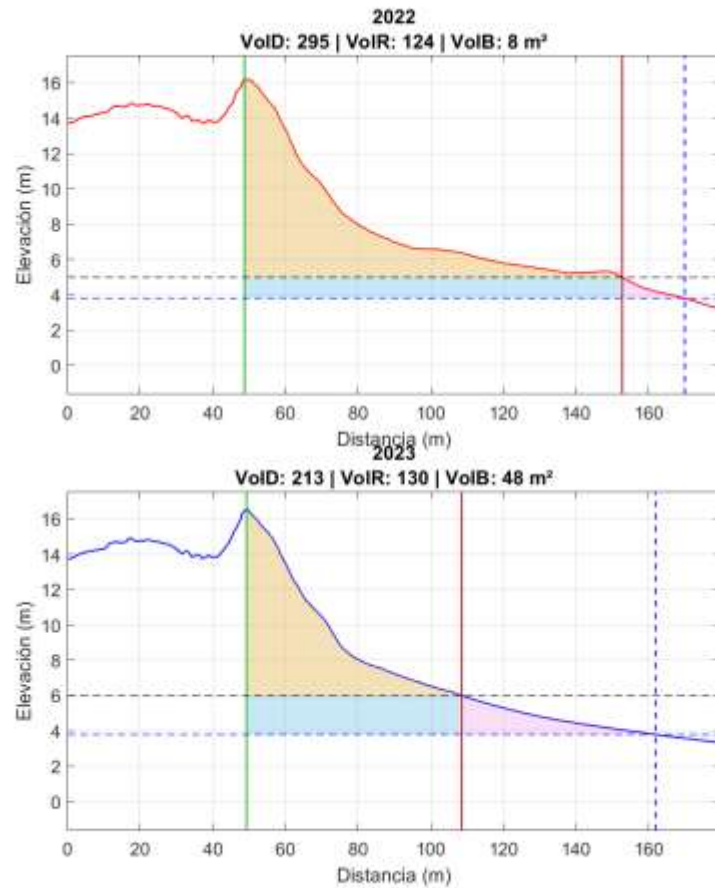


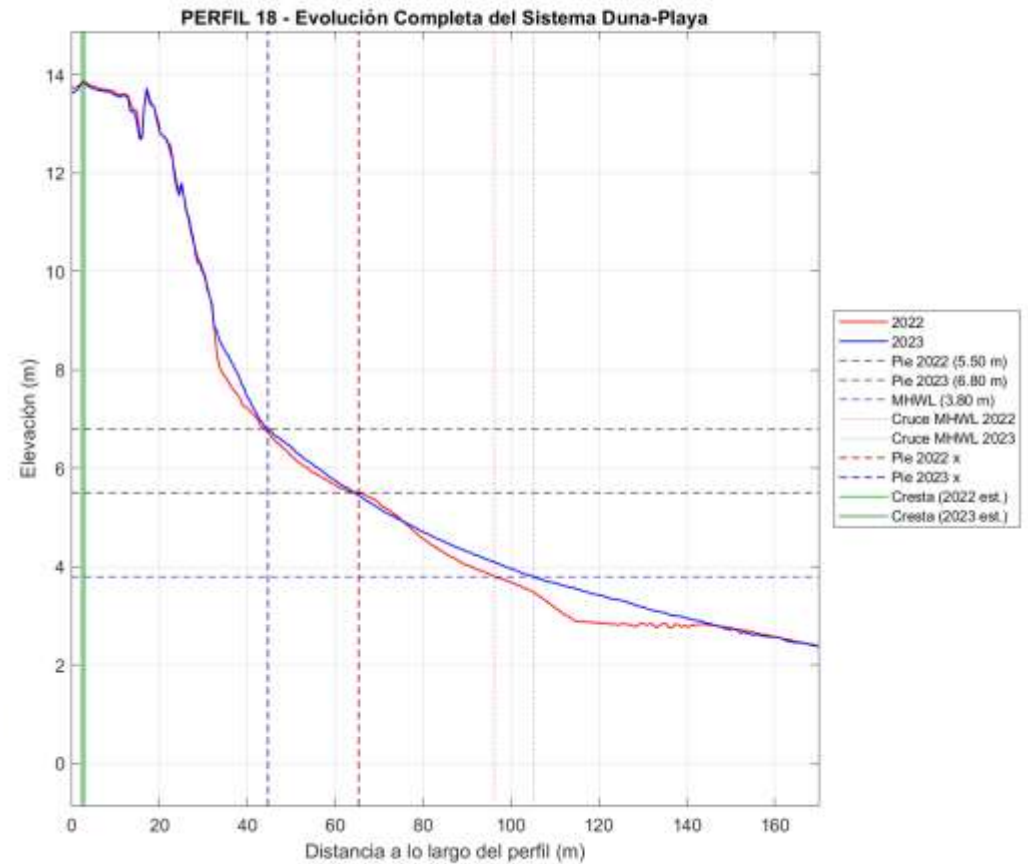
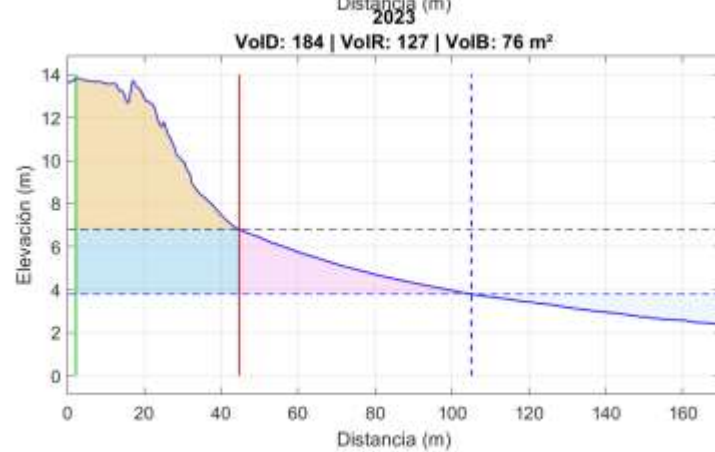
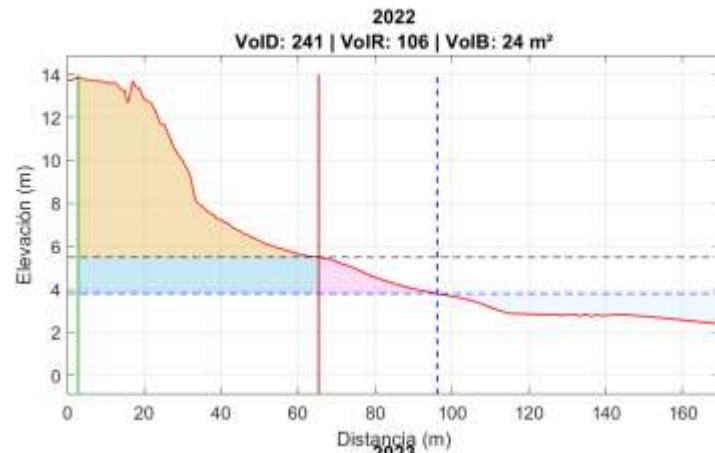


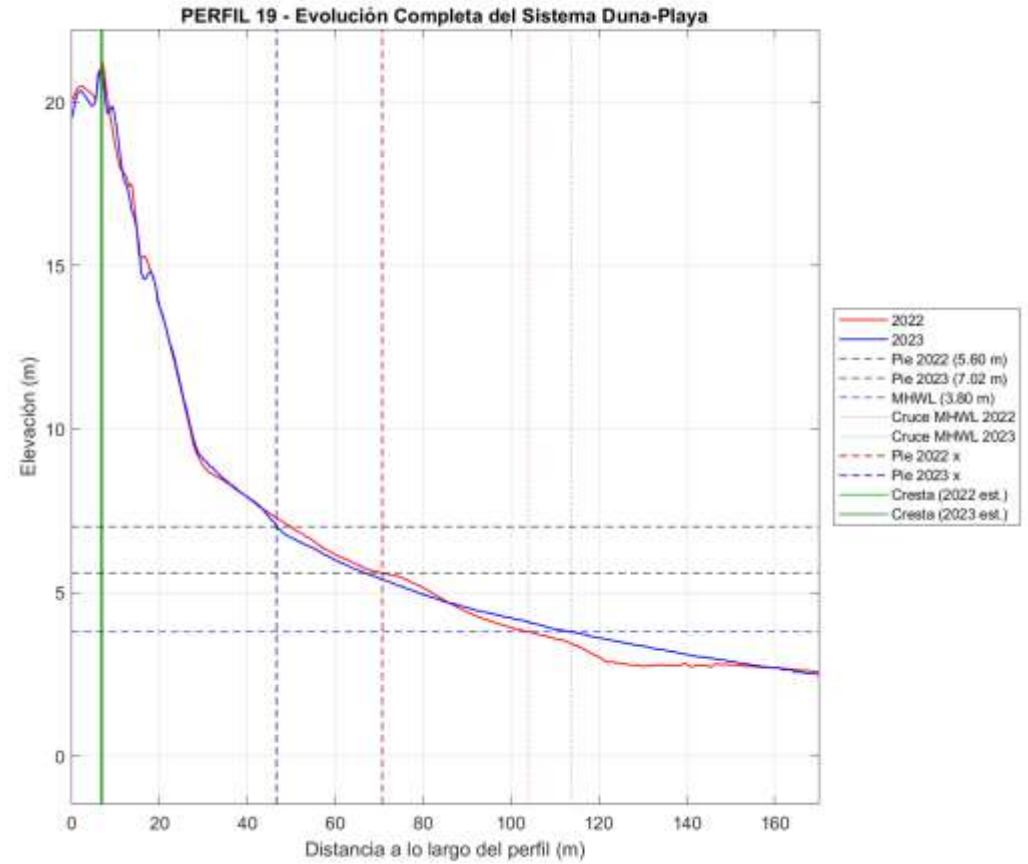
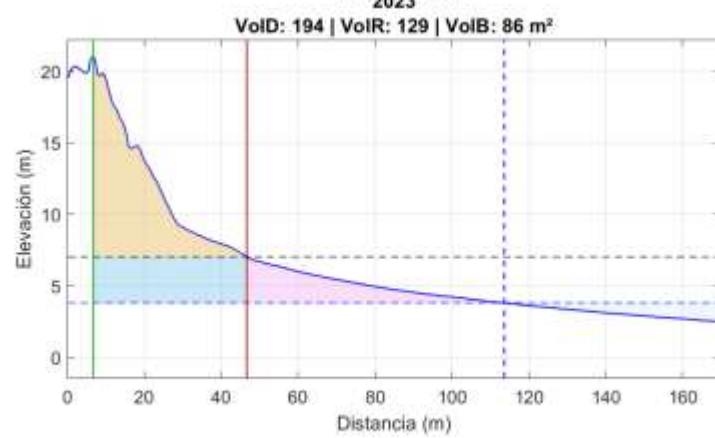
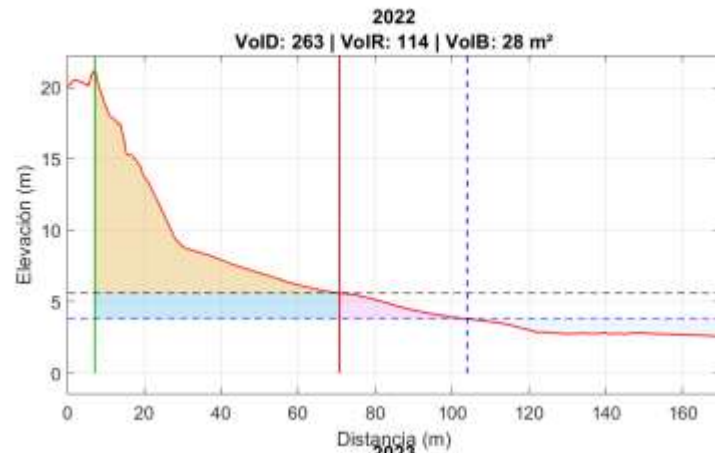


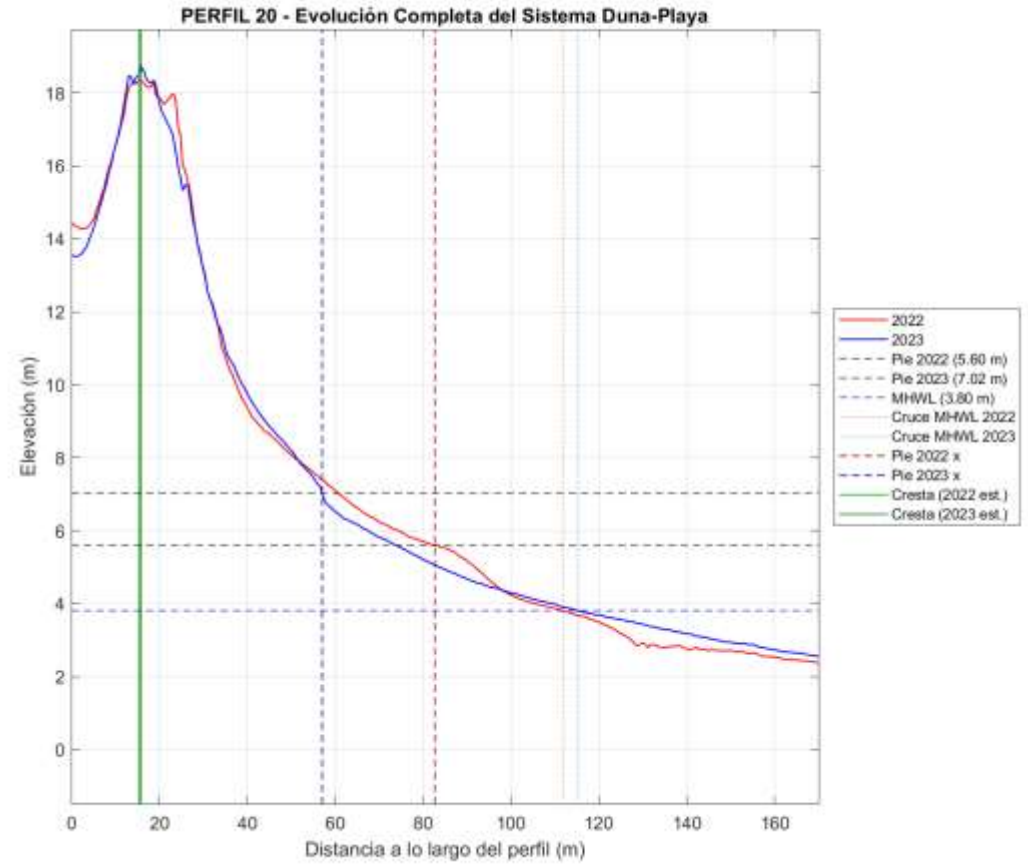
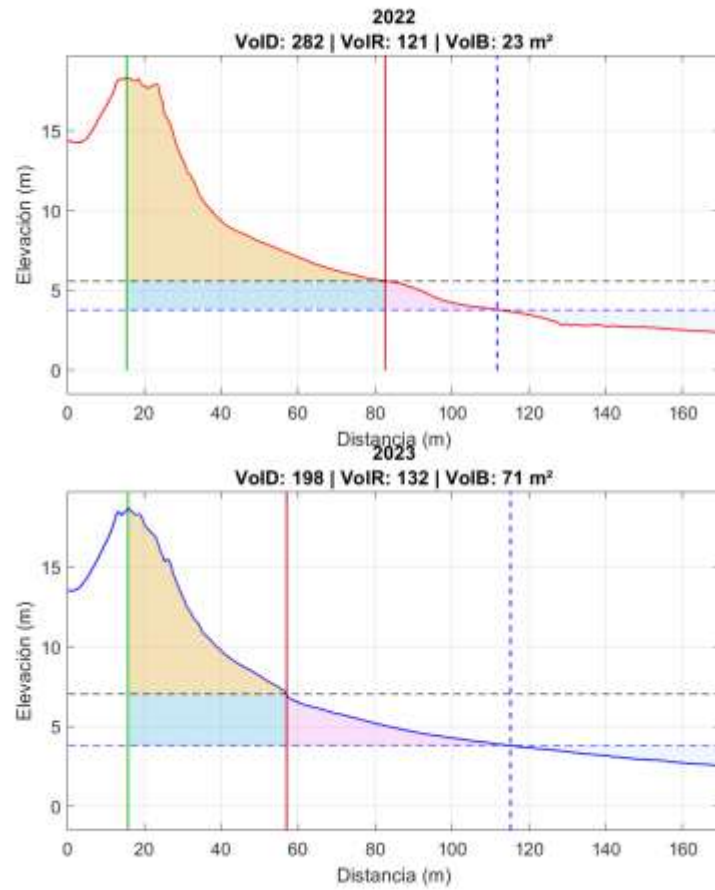


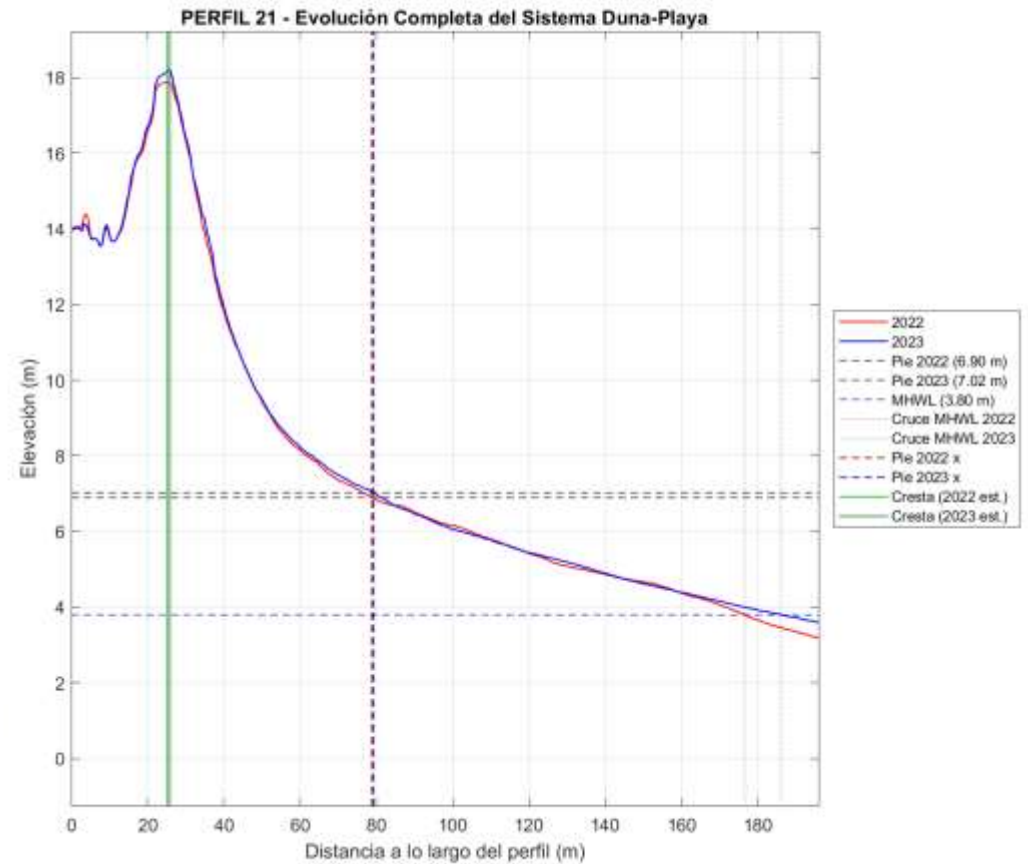
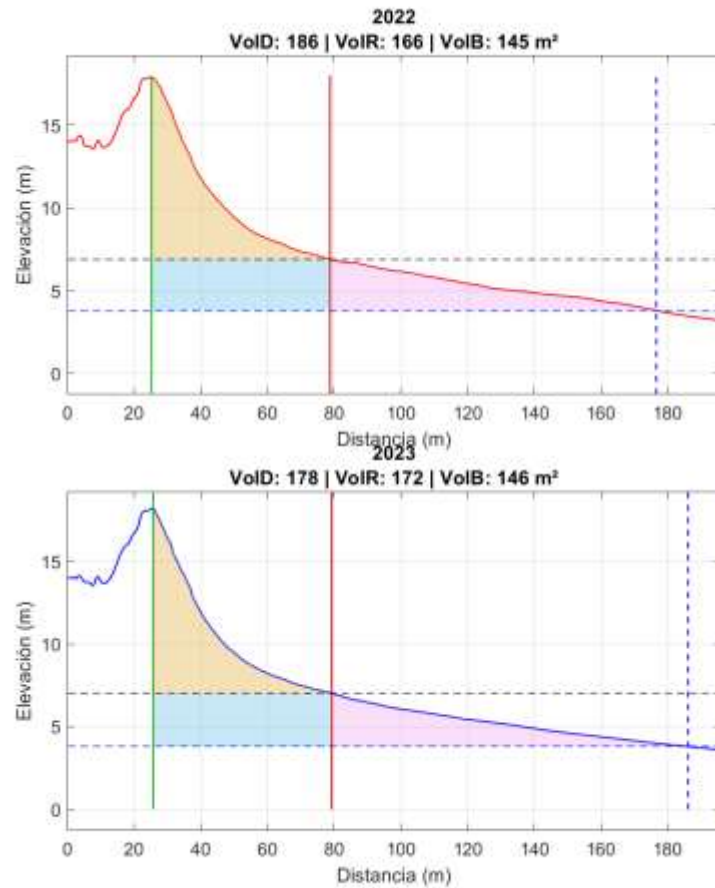


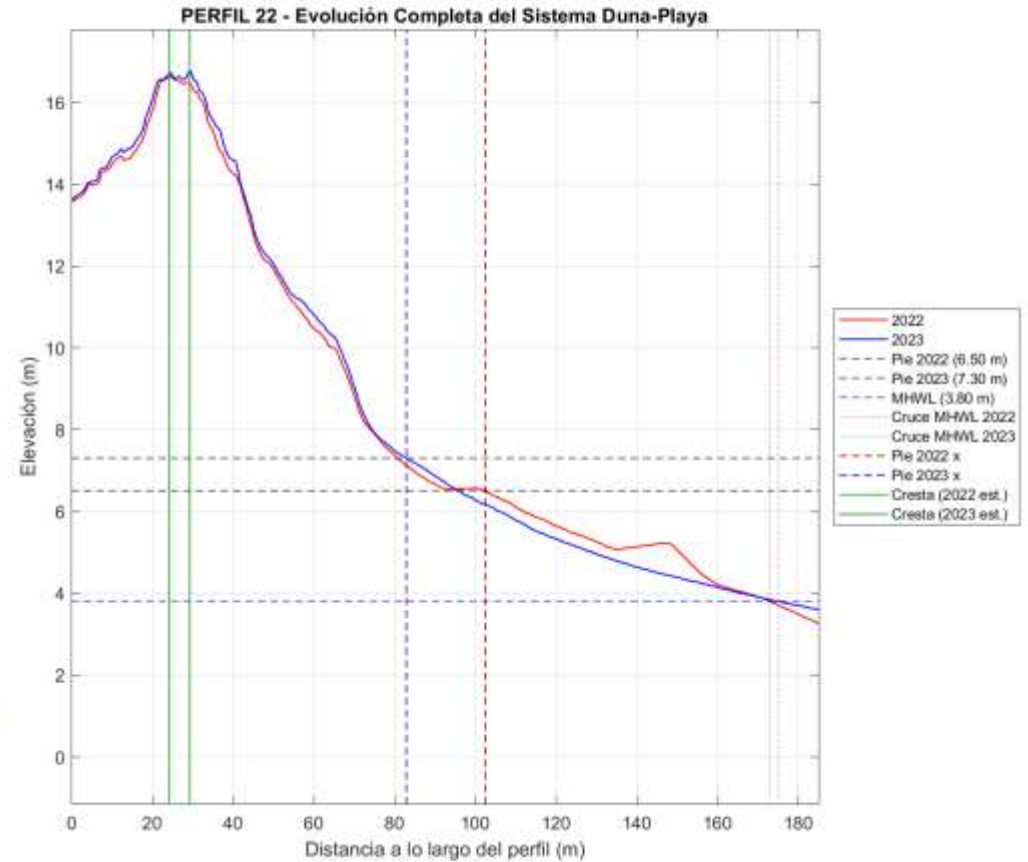
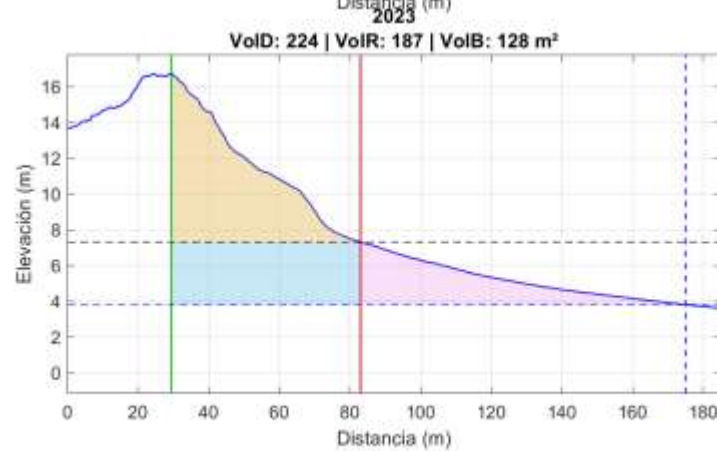
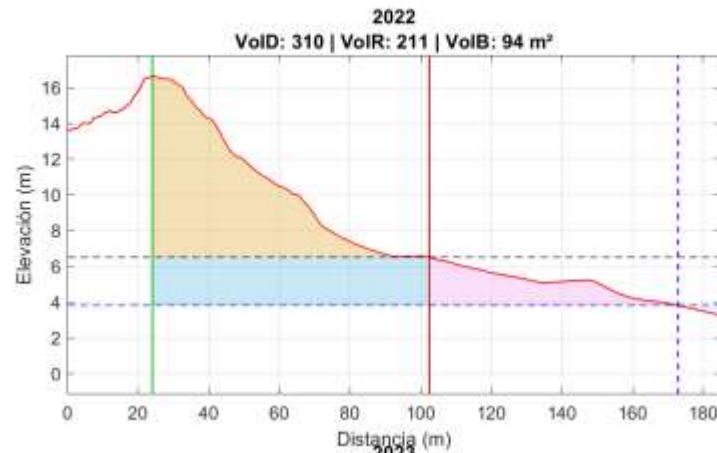












Perfiles 2023-2024

