Informe ambiental de la Bahía de Sant Antoni (Ibiza): turbidez, calidad microbiológica y estado general

Informe final

Enero 2025





Autores

- Criollo Manjarrez, Rotman Alejandro (Hidrogeología)
- Delgado, Ana Laura (Teledetección marina)
- Font Muñoz, Joan Salvador (Material particulado)
- Guadayol Roig, Oscar (Nutrientes)

Coordinación

- Basterretxea Oyarzabal, Gotzon
- Martínez Ribes, Lorena
- Pereda Briones, Laura

Contacto

Oficina de Transferència de Resultats de d'Investigació (OTRI) i projectes

Edifici Instal·lacions Esportives Campus UIB Ctra. de Valldemossa, km 7.5 07122 Palma · Illes Balears CIF: G-07779895 Tel. +34 - 971 25 96 83

Lluis.tudela@fueib.org

Referencia

Criollo, R.A., Delgado, A.L., Font-Muñoz, J.S., Guadayol, O. 2025. Informe ambiental de la Bahía de Sant Antoni (Ibiza): turbidez, calidad microbiológica y estado general. En: Basterretxea G. Martínez-Ribes, L, Pereda-Briones, L. (coor.). Encàrrec a mitjà propi per a la realització de l'estudi ambiental de la badia de Sant Antoni (Illa d'Eivissa). ENC 01/2024. FUEIB.

Agradecimientos

Agradecemos a la Agencia Balear del Agua y la Calidad Ambiental - ABAQUA su confianza en la FUEIB y en el IMEDEA para la elaboración del presente informe técnico. Los Ayuntamientos de Sant Antoni y Sant Josep han sido siempre receptivos a nuestras solicitudes de información, lo que ha facilitado el estudio. Ports IB ha facilitado que pudiéramos llevar a cabo la campaña de toma de muestras, proporcionándonos un amarre durante la estancia en el puerto. Arenal Diving, centro de buceo sito en la Bahía, ha supuesto una ayuda inestimable a la hora de la instalación, mantenimiento y recuperación de instrumentos. Contar con su ayuda, motivación y determinación a la hora de investigar los posibles problemas de las aguas de la Bahía ha sido su mejor aportación. Agradecemos la colaboración de Juan Antonio Maestro, patrón de la embarcación del IMEDEA y de Eva García Ortiz de la empresa TRAGSA en la toma de muestras de campo. Finalmente, agradecemos a AEMET por la cesión de los datos meteorológicos de alta resolución de Ibiza.



Contenido

1. 2. 3.	OB.	JETI\	CACIÓN VOS EDENTES	.14
	3.1	MEI	DIO FÍSICO: CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES	.15
	3.2	COI	NDICIONES CLIMÁTICAS Y METEOROLÓGICAS	.16
	3.3	HID	ROLOGÍA	.17
	3.4	HID	ROGRAFÍA Y DINÁMICA COSTERA	.20
	3.5	SE	DIMENTOLOGÍA	.21
	3.6	CAF	RACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS DE LOS FONDOS MARINOS	.23
	3.7	ACT	TIVIDAD SOCIO-ECONÓMICA	.26
	3.7.	.1	Población y actividad hotelera	.26
	3.8	SAN	NEAMIENTO URBANO	.27
	3.8.	.1	Actividad portuaria.	.28
	3.9	FIG	URAS DE PROTECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	.29
	3.10	MAI	RCO LEGAL	.31
			RES QUE INCIDEN SOBRE LA TURBIDEZ Y CALIDAD MICROBIOLÓGICA	
	4.1	APC	ORTES TERRESTRES: HIDROGEOLOGÍA E HIDROQUÍMICA	.35
	4.1.	.1	Hidrogeología	.36
	4.1.	.2	Hidroquímica de las aguas subterráneas	.37
	4.2	DIN	ÁMICA COSTERA	.47
	4.2.	.1	Condiciones meteorológicas y clima marítimo	.47
	4.2.	.2	Nivel del mar y corrientes	.51
	4.2.	.3	Granulometría e influencia del viento sobre la turbidez	.53

	4.3 PART	CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DEL SEDIMENTO Y EL MATERI. FICULADO EN SUSPENSIÓN (SMP)	
	4.3	.1 Influencia de la escorrentía en la turbidez y la concentración de clorofila-a	60
	4.4	CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE LAS AGUAS DE BAÑO	65
6.	RE	NCLUSIONES Y RECOMENDACIONESFERENCIASS	74
	A.1 N	IETODOLOGÍA	77
	1.	Corrientes marinas	77
	2.	Sólidos en suspensión.	77
	3.	Imágenes satelitales	77
	4.	Nutrientes	79
	A2. N	IICROBIOLOGÍA	79
	1	Series temporales	79
	2	Boxplot	86



Listado de figuras

Figura 1. Mapa de usos de suelo en la bahía de Sant Antoni. Las zonas catalogadas como urbanizables incluyen solares, zonas aún agrícolas y aquellas zonas urbanizadas que se han ido añadiendo al núcleo urbano más antiguo. Se indica la localización de los torrentes a los que se hace referencia en el texto. Fuente: idelB
Figura 2. Cuencas hidrográficas de la Bahía de San Antoni. IDEIB (2023)18
Figura 3. Masas de agua de la Bahía de Sant Antoni (García de Domingo et al. 2009; Instituto Geológico y Minero de España)
Figura 4. Ortofotografía del interior de la bahía Año 1956. La línea negra indica el límite de la playa seca. Fuente: Ofincar 201922
Figura 5. Ortofotografías del interior de la bahía. Año 2018. Línea roja, playa actual; línea negra referencia 1956. Fuente: Ofincar 2019
Figura 6. Hábitats marinos de la Bahía de Sant Antoni. Adaptado de idelB (2019)23
Figura 7. Comparativa de las ortofotos de los años 1956, 1984, 2001 y 2021 extraídas del visor idelB25
Figura 8. Redes pluviales y de saneamiento del municipio de Sant Antoni de Portmany27
Figura 9. Puntos de vertido y aliviaderos en el interior de la Bahía de Sant Antoni. Fuente: idelB 28
Figura 10. Espacio Marino del Poniente y Norte de Ibiza. La línea naranja delimita la ZEPA ES0000516. FUENTE: EU DOPA explorer
Figura 11. Delimitación de las distintas zonas de protección que afectan a la Bahía de Sant Antoni
Figura 12. Evolución local de los niveles piezométricos en pozos de la cuenca hidrográfica de Sant Antoni durante el periodo 2016-2021
Figura 13. Diagrama de Piper de los más cercanos a la bahía de Sant Antoni con datos disponibles. Se aprecia una disminución de las concentraciones de cloruros y aumento de sulfatos en los puntos El0173 (Can Pere March I) y El0307 (Mestre Sa Bassa)
Figura 14. Mapa de diagramas de Stiff de las campañas más actuales del año 2021. Todos los puntos, excepto el punto El0182, presentan valores muy altos de cloruros. Los puntos El0307 y El0173 presentan datos en invierno y verano; siendo este último punto el que más oscilación estacional presenta de los 2 puntos.

Figura 15. Evolución de la conductividad eléctrica. Al no disponer de unidades asociadas a este parámetro, se ha supuesto valores en mS/cm. El punto El0179 presenta valores muy altos, mientras que los demás puntos de control cercanos a la bahía de Sant Antoni, presentan valores que oscilan entre 1-2mS/cm
Figura 16. Diagrama SAR vs conductividad eléctrica de los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni de las muestras analizadas durante el 2021
Figura 17. Evolución de concentración de cloruros de los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni. Se aprecia un aumento de sus concentraciones en los puntos El0179 (Can Micolau) y El0173 (Can Pere March I)41
Figura 18. Esquema de intrusión marina y cómo las extracciones de agua subterránea pueden aumentar la intrusión y salinizar estos pozos (FCIHS, 2009)42
Figura 19. Diagrama Schöeller-Berkaloff. Relaciona los patrones de composición de las aguas muestreadas. Se aprecia la alta influencia del sodio y cloruros en su composición42
Figura 20. Evolución de nitratos (2016-2021). El punto El008 (X-5 Noria Es plà) presenta valores crecientes que se dejaron de monitorizar en 2019
Figura 21. Concentración de nitratos en julio de 2021. Los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni presentan concentraciones superiores a los 20 mg/l
Figura 22. Concentración de nitratos en septiembre de 2021. Los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni presentan concentraciones superiores a los 20 mg/l
Figura 23. Distribución de Cloruros y Sodio (mg/l) de los datos disponibles en los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni (El0173, El0745, El0307, El0310). Su distribución indica un aumento de cloruros, principalmente por un aporte de agua de mar (intrusión salina)45
Figura 24. Relación cloruros (CI) - nitratos (NO3) en relación a estudios previos de origen de las aguas muestreadas en los puntos El0173 (a), El0745 (b), El0307 (c) y El0310 (d). (fondo de la figura: BGS, 2003. Extraído de FCHIS, 2009). Esta comparación da una primera idea de la posible mezcla de aguas de origen antrópico, principalmente de abastecimiento urbano y aguas de irrigación
Figura 25. Serie temporal de temperatura atmosférica, precipitación e intensidad de viento en el Aeropuerto de Ibiza para el periodo 2014-2024. Datos AEMET48
Figura 26. Rosas de viento estacionales en el Aeropuerto de Ibiza (Datos AEMET)49
Figura 27. Rosa de viento para el periodo Mayo-Julio 2024 en la Bahía de San Antoni (Lon. 1.219E Lat. 38.951N, Datos SOCIB)
Figura 28. Rosas estacionales de oleaje (altura significante, m) en el punto SIMAR 2099108 situado en la Bahía de San Antoni (1.25 oE, 39.00 oN). Puertos del Estado



Figura 29. Variaciones de nivel del mar registradas en la bocana del puerto durante el presente estudio. A) variaciones del nivel del mar. B) Oscilaciones de marea. C) variaciones de frecuencia supramareal
Figura 30. a) Espectro de variación de la corriente media y b) perfil medio de corrientes. Los vectores corrientes u y v se han rotado -45º para alinearlos con el eje principal de oscilación de la corriente. c) corrientes en superficie (rojo) y fondo (azul) y sus correspondientes elipses de variación. d) corriente media de la columna de agua y su elipse de variación
Figura 31. Variación de las corrientes en el punto de muestreo del presente estudio. A. Promedio vertical. B y C, Componentes longitudinal y transversal a la bocana del puerto. Ver anexo metodológico
Figura 32. Relación entre el tamaño de sedimento y la velocidad crítica (Vr). Las zonas sombreadas muestran los valores correspondientes a la granulometría del sedimento del interior de la playa de Sant Antoni
Figura 33. A) Amplitud de eco (log dB) y b) registros de la componente axial de corriente media e intensidad del viento durante el periodo analizado
Figura 34. Distribución de SPM en el rango entre 2 y 300 micras en la Bahía de Sant Antoni. Valores expresados como número de partículas/litro
Figura 35. Distribución de SPM en el rango entre 2 y 50 micras en la Bahía de Sant Antoni. Valores expresados como número de partículas/litro
Figura 36. Distribución de SPM en el rango entre 60 y 300 micras en la Bahía de Sant Antoni. Valores expresados como número de partículas/litro
Figura 37. Ratio entre las partículas suspendidas (SPM) pequeñas (entre 2 y 50 micras) y grandes (entre 60 y 300 micras)
Figura 38. A) Espectro de tamaños del fitoplancton en la bahía de Sant Antoni y ajuste a ley de potencias (línea roja). B) Distribución espacial de la concentración de células de fitoplancton (nº part L-¹). C) Relación entre la concentración de partículas suspendidas y la concentración de Chla (R=0.85, p<0.001). D) Distribución espacial de la concentración de clorofila-a (mg m-³).59
Figura 40. Imagen SENTINEL-2 de turbidez (NFU) en la Bahía de Sant Antoni el día 24/10/2021. 61
Figura 41. Imagen SENTINEL-2 de turbidez (NFU) en la Bahía de Sant Antoni el día 19/09/2022.
Figura 42. Imagen SENTINEL-2 de turbidez (NFU) en la Bahía de Sant Antoni el día 24/08/2024. 62
Figura 43. Promedio de 5 imágenes de clorofila-a (mg/m3) correspondiente al mes de agosto en el periodo 2018-2024. Datos del satélite Sentinel-2

Figura 44. Imagen SENTINEL-2 de clorofila-a en la Bahía de Sant Antoni el día 24/10/2021.64
Figura 45. Imagen SENTINEL-2 de clorofila-a en la Bahía de Sant Antoni el día 19/9/202264
Figura 46. Imagen SENTINEL-2 de clorofila-a en la Bahía de Sant Antoni el día 19/08/2024.65
Figura 47: Localización de los puntos de muestreo de calidad microbiológica en el periodo 2008- 2024 por parte de la Conselleria de Sanidad y Consumo de las Islas Baleares en la zona de estudio
Figura 48. Boxplot de las series temporales de microbiología. Las cajas blancas indican el percentil 25 y 75 de cada serie. El cuadrado azul muestra la mediana cuyo valor se indica sobre cada caja. Las líneas discontinuas indican los límites de las series exceptuando los outliers. La línea roja indica el valor medio de las estaciones de referencia o menos contaminadas mostradas con fondo verde (Tarida, D'Hort y Salines)
Figura 49. Serie temporal (2008-2024) de EC y Ent a lo largo de los años en los puntos S'Arenal y Badía. Las figuras de la izquierda muestran los datos en bruto y las de la derecha indican la distribución de los valores anuales mediante boxplots. Nótese que las escalas son distintas.69
Figura 50. Red en baja de Sant Antoni incluyendo el emisario y los aliviaderos de pluviales. 70



Listado de tablas

Tabla 1. Balance hídrico de la masa de agua subterránea 2002M2 de la Bahía de Sant An Fuente: Plan Hidrológico, 2015	
Tabla 2. Porcentajes relativos de superficies vegetales en función del rango de profundidad la playa de la bahía de Sant Antoni (Tecnología Ambiental, 1994)	
Tabla 3. Clasificación microbiológica de las aguas de baño según anexos I y II del l 1341/2007. (*) Con arreglo a la evaluación del percentil 95. (**) Con arreglo a la evaluación percentil 90	n del

Resumen ejecutivo

El presente informe recoge los resultados de un estudio encargado por la Agència Balear de l'Aigua i la Qualitat Ambiental (ABAQUA) a la Fundació Universitat-Empresa de les Illes Balears (FUEIB) para la evaluación de las aguas de la bahía de Sant Antoni en aquellos aspectos relativos a la turbidez de las aguas y su calidad microbiológica. El estudio se basa en la información recopilada de estudios previos, bases de datos y registros de distintas instituciones, así como en una campaña de muestreo realizada en julio de 2024. Debido a las limitaciones en los muestreos, el presente estudio aborda los problemas más generales de la bahía. Aunque existen evidencias de problemas ambientales puntuales asociados a la construcción, pérdidas en las redes, descargas de aguas no autorizadas, etc., por su limitado impacto o episodicidad no se analizan en el presente estudio.

La Bahía de Sant Antoni, situada en la costa oeste de Ibiza, es un cuerpo de mar orientado al norte con profundidades máximas de unos 80 metros en su parte exterior y más profunda y aguas someras (<10 m) en su cuenca interna, protegida por un dique portuario. A lo largo de su costa desembocan los cauces de cuatro torrentes principales (Sa Fontassa Buscatells, Es Torrent, Torrent de Cala Gració y Torrente Reguero) que únicamente fluyen durante los episodios de precipitación más intensa. Las aguas urbanas tratadas por la EDAR se evacúan a través de un emisario que parte del Caló de S'Oli en dirección noroeste hasta la isóbata de 32 m y, salvo en circunstancias de mal funcionamiento, no contribuye de forma importante al deterioro de la calidad de las aguas. Por el contrario, los aliviaderos de las aguas pluviales se concentran en el interior del puerto y contribuyen de forma importante a la turbidez durante los episodios de lluvias. Los datos de satélite muestran niveles relativamente elevados de turbidez, que aumenta entre un 20 y un 150% durante los episodios de lluvia intensa, e incrementos de clorofila en los que los valores superan los 5 mg m⁻³ a lo largo del paseo y costa de S'Estanyol. La turbidez tiende a acumularse en la parte norte del puerto debido a la circulación ciclónica de las aguas (sentido antihorario a lo largo de la costa). En promedio, las lluvias moderadas - ej. 10mm/día- ocurren 10 veces al año y 3 veces al año se exceden los 25 mm/día.

Otra fuente de variación de las propiedades ópticas de las aguas es la presencia de microalgas que aportan un color pardo/verdoso a las aguas. Estos organismos proliferan cuando los nutrientes en el agua, particularmente nitratos, son abundantes. Aunque el acuífero costero de Sant Antoni presenta en algunos puntos concentraciones elevadas de nitrato que pueden ser indicativas de contaminación de origen agrícola o por contaminación de aguas residuales (5 a 40 mg/l), el agua costera no indica un exceso generalizado y permanente de nutrientes. Tanto las concentraciones de nitratos, como los valores de clorofila medios (nitrato=0.53±0.7 µM y 1.40±0.45 mg/m³ respectivamente) son razonables para un entorno costero Mediterráneo con elevada presión antrópica. Sin embargo, el aporte de nitrógeno puede ser puntualmente elevado (ej. nitrato >2.5µM, amonio >6.8 µM), lo que sugiere la existencia de episodios esporádicos de deterioro de la calidad del agua debido a bombeos desde el acuífero o roturas en la red. De igual modo, los valores medios de clorofila en el interior de la bahía indican cierto



grado de eutrofización que, como hemos ya mencionado anteriormente, se exacerba durante los episodios de lluvia.

Durante los períodos secos, la atenuación de la luz en las aguas de la Bahía está determinada por el crecimiento del fitoplancton y por los eventos de resuspensión de partículas, si bien, como hemos indicado anteriormente, la concentración de clorofila no es en promedio excesivamente elevada. El material particulado o SMP está dominado por células de fitoplancton, que representan más del 95% de las partículas suspendidas. La mayor parte de estas son de pequeño tamaño (<15 µm) aunque, en las zonas cercanas a la playa del puerto, se observa una fracción de partículas de mayor tamaño (30-70µm) que podría estar asociada a la mayor disponibilidad de nutrientes procedentes del acuífero o de las redes urbanas.

La pérdida de cobertura vegetal en algunas zonas del puerto junto con la presencia de materiales finos y el exceso de materia orgánica favorecen la turbidez. La pradera de posidonia en la zona sur del puerto se encuentra muy fragmentada y las tasas de sedimentación de materia orgánica en esta zona son elevadas (>1,5 gDW m⁻² d⁻¹). Las corrientes medias son generalmente débiles (i.e. <3 cm/s) pero pueden intensificarse en respuesta a episodios de viento u otros fenómenos oscilatorios alcanzando frecuentemente velocidades instantáneas de 15 cm/s. Dada la naturaleza del sedimento (0.09 a 0.20 mm) y la abundancia de materia orgánica, estos valores puntuales de las corrientes superan la velocidad crítica de movimiento del sedimento (8.5 a 12 cm/s) lo que contribuye a incrementar la turbidez de las aguas. Sin embargo, estos episodios en los que se resuspende el material del fondo marino son por lo general de corta duración (horas a pocos días).

El análisis microbiológico destaca la presencia de niveles bajos, pero quasi-permanentes, de contaminación en el interior de la bahía. Si bien los valores de patógenos exceden los valores legales para aguas de baño muy excepcionalmente, algunas zonas de la bahía presentan una tendencia creciente en los valores de *Escherichia coli* desde el año 2015. En particular, se detectaron concentraciones más elevadas de bacterias patogénicas en el entorno urbano (Playa de S'Arenal) y en la zona sur (Badía Sant Antoni y Port des Torrent).

Abordar la turbidez y el estado microbiológico de las aguas de la bahía requiere un enfoque multifactorial que incluya la colaboración de las partes interesadas, mejoras de infraestructura y programas de concienciación comunitaria. La Bahía de Santa Antoni muestra signos de deterioro ambiental que previsiblemente aumentarán con la creciente presión antropogénica sobre el sistema (aumento de la población y de la actividad económica). Las actuaciones sugeridas incluyen la aplicación de regulaciones más estrictas sobre las actividades de construcción que descargan aguas a los torrentes o a la costa, la ordenación del tránsito y fondeo de embarcaciones, renaturalización de torrentes y mejoras en la gestión de la escorrentía. Mejorar la calidad del agua de la Bahía y de los sus ecosistemas, sin duda, repercutirá en el bienestar de los habitantes y visitantes de la zona.

1. JUSTIFICACIÓN

El objetivo del presente informe es evaluar el origen de la turbidez de las aguas y deterioro de la calidad microbiológica de la Bahía de San Antonio. El estudio responde a la necesidad de la Agencia Balear de la Calidad del Agua (ABAQUA) de clarificar los problemas ambientales que afectan a esta zona y realizar una toma de decisiones en base a una información detallada que permita mejorar la protección del medio ambiente. A lo largo del año 2022 se mantuvieron varias reuniones de la 'Mesa de l'aigua' constituida por diversas entidades públicas, asociaciones vecinales y no gubernamentales cuyo objetivo principal es mejorar y recuperar la calidad ambiental de la bahía mediante soluciones colaborativas entre todas las entidades integrantes. En una evaluación preliminar realizada por dicha asociación se identificaron tres problemas principales que afectan negativamente a las aguas de la Bahía; (1) el tránsito de grandes buques, (2) el fondeo incontrolado de embarcaciones deportivas y (3) los vertidos de aguas urbanas sin tratamiento previo. En la reunión de diciembre de 2022, la 'Mesa de l'aigua' solicitó que el IMEDEA (UIB-CSIC), a través de ABAQUA y de la Fundación Universidad Empresa de las Islas Baleares (FUEIB), como medio propio del Govern, realizara una evaluación de algunos aspectos ambientales de la Bahía que se percibía influían negativamente en el estado ambiental. En particular, preocupaba la turbidez de las aguas y la contaminación microbiológica. El presente informe pretende responder a dicha preocupación y, en base a la información disponible, proponer posibles soluciones que ayuden a mejorar la salud ambiental de la Bahía.



2.OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es evaluar los procesos que contribuyen a la turbidez y la calidad microbiológica y estado general de la Bahía de San Antonio. El análisis se basa en la información previa disponible procedente de distintas entidades públicas y de un muestreo prospectivo realizado durante el verano de 2024.

Específicamente el estudio se centra en:

- Evaluar los patrones espaciales de turbidez en la Bahía de Sant Antoni y cómo se ven afectados por la resuspensión del sedimento.
- Analizar la calidad microbiológica de las aguas en la Bahía Sant Antoni en base a la información disponible e identificar las posibles fuentes de contaminación.
- Identificar las presiones antrópicas, vías de contaminación y factores coadyuvantes de la bahía, así como los impactos ambientales que se pudieran derivar.
- Analizar la información y proporcionar recomendaciones para mejorar la gestión y mitigar los problemas que se identifiquen.

El presente informe está estructurado en tres secciones fundamentales; i) una primera sección de antecedentes en la que se exponen las condiciones generales ambientales de la Bahía de San Antonio, ii) una sección central enfocada al análisis de los factores que inciden sobre la turbidez de las aguas y la calidad microbiológica de las aguas y iii) una última sección en la que se detallan distintas recomendaciones de actuación para la mejora de la calidad de las aguas y el estado de los ecosistemas costeros.

3.ANTECEDENTES

3.1 MEDIO FÍSICO: CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES

La bahía de San Antoni, situada al oeste de Ibiza, es un cuerpo de mar orientado al norte con profundidades máximas de unos 80 metros en su parte más profunda. La zona interior es una costa de morfología aconchada que, protegida por el espigón del puerto, alberga una serie de playas divididas por pequeños promontorios (S'Arenal, Pouet, S'Estanyol, Pinet). La profundidad máxima en esta zona es de 10 metros, junto al dique del puerto, si bien las sondas varían por lo general entre los 2 y 8 metros. En la costa norte, fuera de la zona portuaria, se asientan tres pequeñas calas (Gracioneta, Gració y Caló des Moro). La costa sur, ya fuera del puerto, alberga las playas de Cala Xinxó, Caló de s'Oli, Port d'es Torrent, Cala Bassa y Cala Compte.

La Bahía está rodeada por una costa baja que presenta una suave y progresiva pendiente hacia el este y el sur y una brusca pendiente hacia el norte. Las partes bajas corresponden a una amplia llanura aluvial, constituida por materiales miocénicos y cuaternarios. La vertiente meridional de la bahía aparece como una suave superficie inclinada, de la que sobresalen una serie de montes y sierras de moderada envergadura (Serra d'en Síndic, Pujol Gros, Puig Serral), de forma que las principales elevaciones se encuentran en su borde meridional, destacando el Puig de s'Avenc (339m) y las estribaciones septentrionales de la Talaia de Sant Josep, donde se alcanza la máxima cota (347m). Los relieves septentrionales alcanzan su mayor altitud en Can Germà (172m, IGME). Este incremento altimétrico queda reflejado en el litoral por el paso de una costa baja rodeando la bahía, en la que resalta la presencia de Cala Bassa, a una costa acantilada que alberga calas más encajadas. También forman parte de la bahía, la isla de sa Conillera y las demás islas e islotes próximos a ella, como las de mayor superficie: las islas des Bosc y S'Espartar.

La zona costera corresponde a dos municipios colindantes, Sant Antoni de Portmany, que abarca la zona norte hasta las proximidades del Torrente de s'Estanyol y Sant Josep de sa Talaia, que gestiona la franja sur de la bahía (Fig. 1). En la fachada marítima, el suelo urbano se concentra en torno al puerto y la costa sur y se alterna con áreas urbanizables y zonas naturales con distinto grado de antropización.



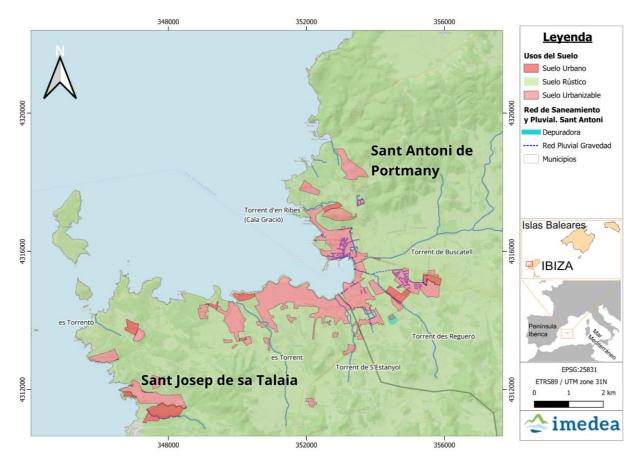


Figura 1. Mapa de usos de suelo en la bahía de Sant Antoni. Las zonas catalogadas como urbanizables incluyen solares, zonas aún agrícolas y aquellas zonas urbanizadas que se han ido añadiendo al núcleo urbano más antiguo. Se indica la localización de los torrentes a los que se hace referencia en el texto. Fuente: idelB.

3.2 CONDICIONES CLIMÁTICAS Y METEOROLÓGICAS

El clima de la Bahía de Sant Antoni corresponde con el típico del área mediterránea: sequía estival, irregularidad interanual en el régimen de lluvias (más concentradas en otoño e invierno) y un invierno moderado. La precipitación anual es de unos 430-470 mm, repartidos en un promedio de 90 días. La humedad relativa media anual se sitúa en torno al 75% y la frecuencia de nieblas sobre el mar es inferior al 5% de días del año (Tecnoambiente, 1995; Ayuntamiento Sant Antoni, 2021). La temperatura media anual se sitúa en 18,3°C, con valores de 25,6°C en el mes más cálido (julio) y 11,9 °C en el más frío (enero). En la mayor parte de los años se superan ampliamente las 2.800 horas de sol al año. En los meses de menor insolación se alcanzan entre 150 y 170 horas mientras que de junio a agosto es frecuente superar las 300 horas de sol al mes (Ayuntamiento Sant Antoni, 2021).

Tanto precipitaciones como temperaturas se encuentran distribuidas de la forma típica en este clima, hecho que condiciona un único, aunque prolongado periodo con un acusado déficit

hídrico que va desde mayo hasta septiembre en el que coinciden los valores más altos de temperatura con los más bajos de precipitación. Los vientos son por lo general de intensidad inferior a 12 km/h. Los eventos con intensidad superior al 40% son muy escasos. Según Tecnoambiente (1995), en las estaciones frías predominan los vientos de componente oeste y suroeste (con una velocidad media de 18km/h), mientras que en verano son más frecuentes los vientos de componente este y sureste (con velocidad media de 14km/h). Las situaciones de calma son poco frecuentes, del orden del 15% de las observaciones.

3.3 HIDROLOGÍA

La red hidrográfica se caracteriza por el reducido tamaño de las cuencas hidrográficas, la irregularidad de las precipitaciones y las particularidades hidrogeológicas del terreno. La mayoría de los cauces de la permanecen secos casi todo el año, salvo aquellos que reciben aportaciones de manantiales o únicamente cuando hay precipitaciones con cierta intensidad horaria. Destacan los siguientes cursos de agua (ver Fig. 1).

- Sa Fontassa Buscatells torrente de 12 km de longitud que discurre hacia la parte más oriental de la Bahía de Sant Antoni y se integra a la red de alcantarillado, contando con una superficie de cuenca de 60,78 km2 (Ver Fig.2).
- Torrente Reguerò Torrente de 7 km de longitud que desemboca al sur de Buscatells y tiene una superficie de cuenca de 16,12 km2.
- Es Torrent de s'Estanyol- Torrente de 6 km de longitud que desemboca aproximadamente en el centro de la zona de estudio, en el municipio de Sant Josep de sa Talaia. Su superficie de cuenca es de 15,35 km2.
- Torrente d'en Ribes en Cala Gració Pequeño torrente situado en el noreste de la zona de estudio, con una pequeña superficie de cuenca de 2,07 km².

La zona de San Antoni está formada por un único acuífero, constituido por los materiales cuaternarios que rodean la bahía de Portmany. Litológicamente el acuífero está integrado por materiales detríticos, mostrando una permeabilidad alta a los de mayor granulometría y mejor selección, entre ellos algunos de origen fluvial, como los fondos de valle y las terrazas fluviales, constituidos por gravas, arenas y arcillas. La menor permeabilidad de la zona se observa en las arcillas y limos de albufera localizados al este de la bahía.

El límite septentrional de la zona de la playa de Sant Antoni, coincide con la aparición de los acuíferos calcáreo - dolomíticos mesozoicos de la zona de Santa Inés - San Miguel. Por otra parte, los límites oriental y meridional con la zona de San Rafael están constituidos por los afloramientos margosos del Mioceno inferior-medio. En cuanto al límite occidental con la zona de Cala Vadella, es más impreciso, basándose en la aparición de afloramientos mesozoicos y miocenos bajo el tapiz cuaternario. El espesor de éste es muy variable y difícil de estimar, aunque en cualquier caso resulta bajo en comparación con el de otras unidades, no llegando a superar los 25m (García de Domingo et al., 2009).

Los parámetros hidráulicos son muy variables dependiendo del contenido arcilloso del depósito cuaternario. No obstante, se pueden considerar transmisividades de unos 100m²/día, aunque



pueden llegar a alcanzar valores en torno a los 1000m²/día, con caudales específicos que varían entre 0,1 y 10 l/s/m (García de Domingo et al., 2009).

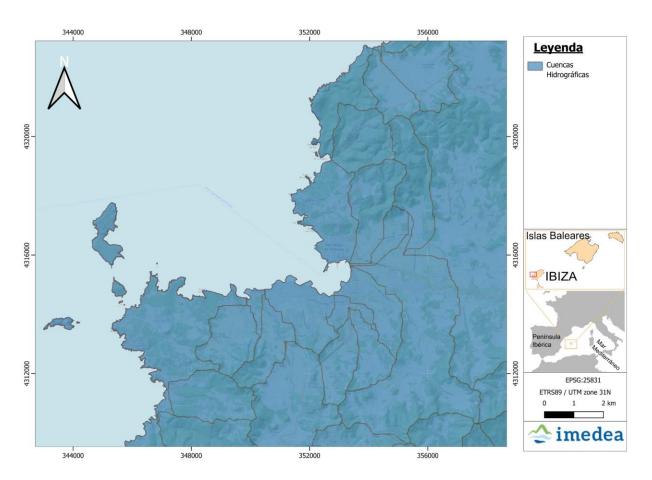


Figura 2. Cuencas hidrográficas de la Bahía de San Antoni. IDEIB (2023).

Según el Plan Hidrológico de las Islas Baleares (2015), la masa de agua de la Bahía de Sant Antoni (EIMC02M4) cubre un área de 9,86 Km² (Fig. 3). Además, cuenta con una masa de agua subterránea (2002M2) conocida como *Pla de Sant Antoni*, que cubre una extensión de 15,20 Km², cuya longitud de costa es de 6,5 Km. La suma de entradas de agua en esta masa subterránea es de 1,80 Hm³, coincidiendo con la suma de salida de agua registrada.

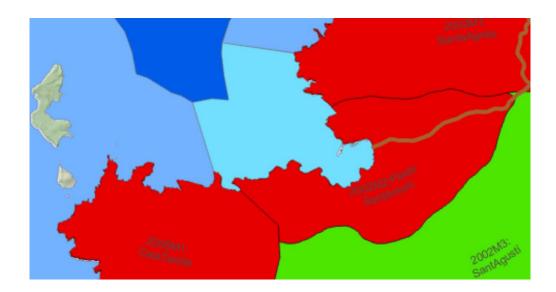


Figura 3. Masas de agua de la Bahía de Sant Antoni (García de Domingo et al. 2009; Instituto Geológico y Minero de España).

De acuerdo con el Plan Hidrológico 2015-2021 (2015) y tal como se muestra en la Tabla 1, la intrusión salina se estima en unos 0.04 Hm3. Esta intrusión de agua marina se detecta tierra adentro a 1 Km de la costa donde los valores de cloruros alcanzan los 600 mg/l. Por otro lado, en la masa de agua subterránea del *Pla de Sant Antoni* existen 175 pozos autorizados, lo que supone un volumen anual autorizado de extracción de 1.1 Hm3. A modo indicativo, la empresa concesionaria FACSA extrajo 0.5 Hm3 para agua de abasto en 2019. Adicionalmente se suministran unos 1.4 Hm3 de agua desalinizada para abasto en el municipio de Sant Antoni de Portmany.

Tabla 1. Balance hídrico de la masa de agua subterránea 2002M2 de la Bahía de Sant Antoni. Fuente: Plan Hidrológico, 2015.

ENTRADAS (Hm³)		SALIDAS (Hm³)	
Infiltración de Iluvia	0,708	Abastecimiento en red	0,523
Transferencia de otras masas	0,800	Agro-jardinería	0,0244
Retorno de riegos	0,017	Regadío	0,174
Pérdida en redes de abastecimiento	0,157	Ganadería	0,003
Pérdidas en redes de alcantarillado	0,080	Torrentes	0,202
Intrusión salina	0,040	Salida al mar	0,657
Suma entradas	1,802	Suma salidas	1,802



3.4 HIDROGRAFÍA Y DINÁMICA COSTERA

El Mediterráneo está situado en un área en la que la tasa de evaporación excede a la de precipitación y a los aportes de aguas continentales de los ríos que vierten en su cuenca. Este balance negativo explica las principales propiedades de las aguas marinas contenidas en la cuenca mediterránea, que actúa a modo de concentrador de sales.

En la zona de estudio se han registrado en septiembre temperaturas del agua de 26° con una marcada termoclina entre 30 y 40 metros. La salinidad se sitúa en esta época entre los 37 y 38 psu y la concentración de oxígeno disuelto en las aguas superficiales es de unos 7mg/l (cercana a la de saturación). En la situación más cercana a la invernal (mediados del mes de abril) la temperatura superficial del agua es de 16°, sin una termoclina marcada. En los niveles más profundos -a partir de unos 100 metros-, la temperatura es de 13°, la salinidad es más elevada y las concentraciones de oxígeno disuelto alcanzan los 8 mg/l (Tecnoambiente, 1995).

La dinámica general de la costa occidental de Ibiza está determinada por la confluencia de distintas masas de agua, entre ellas, el Agua Atlántica Modificada (AAM), que se origina a partir de las aguas atlánticas que ingresan en el mar Mediterráneo a través del estrecho de Gibraltar. Cuando está presente en el canal de Ibiza, esta masa de agua se puede detectar fluyendo hacia el norte a lo largo de la parte oriental del canal. Otra de las aguas superficiales es el Agua Superficial Mediterránea Residente (también conocida como Agua Local Atlántica), que se presenta en forma de agua atlántica muy modificada debido a su largo tiempo de residencia en el Mediterráneo. Esta masa de agua, transportada por la Corriente de Liguria, se acelera al encontrarse con la costa española (Millot, 1987) y se desvía hacia el sur siguiendo el talud continental. Una parte gira hacia el este y cierra un gran giro ciclónico alrededor del Mar Balear. El encuentro de estas dos aguas superficiales forma el llamado Frente Balear, que se observa a menudo en el Canal de Ibiza. El sumatorio de las direcciones de las corrientes determina que las masas de agua superficiales se dirigen hacia el noreste, siguiendo una dirección paralela a la costa occidental de la isla. La intensidad de la corriente es baja, con velocidades situadas entre 10 y 20 cm/s y está asociada fundamentalmente al talud continental. En el interior de la plataforma la circulación es aún más débil y está principalmente determinada por el viento.

La orografía de la zona de estudio determina que este tramo de costa esté sometido directamente a los oleajes de procedencia norte y, en menor medida, del oeste. (Tecnoambiente, 1995). De manera más concreta, y debido a la ubicación de la playa de Sant Antoni, los oleajes provenientes del segundo y tercer cuadrante no tendrán incidencia, pues la Bahía está abierta al W y protegida por la Isla Conejera, que impide el paso de los temporales de Poniente. Además, el emplazamiento del actual dique de abrigo del puerto, que parte de la Punta de Covas Blancas y tiene una longitud aproximada de 375m con dirección SSW y cota al pie del morro de -9,5m, actúa como barrera frente a oleajes del NW, por lo que solamente podrán alcanzar la playa los oleajes de dirección WNW. Esta playa está situada en la parte más interior de la Bahía, se apoya en su extremo Sur en un saliente rocoso natural (Es Molí) que

alcanza hasta los 3m de profundidad de manera escalonada y se prolonga en su base con bloques dispersos. Al Norte, un espigón de unos 100m de longitud, que llega hasta la cota -1,0 aproximadamente, la separa de la zona de servicio pesquero-deportivo de Sant Antoni.

3.5 SEDIMENTOLOGÍA

Geológicamente la Bahía de Sant Antoni es de naturaleza calcárea: arenisca, calcáreas, conglomerados, margas, etc. (Govern Illes Balears, 2020). La mayor parte de las islas que se ubican frente a la costa se encuentran incluidas en espacios naturales y de la Red Natura 2000, a excepción de pequeños islotes como el de Cala Salada.

En el año 1989 la Demarcación de costas realizó una regeneración de las playas interiores de la Bahía en las que se vertieron 4500m3 de sedimento por lo que supuso una ampliación de la playa seca que aumentó hasta los 30 m de anchura respecto a su superficie original según la ortofoto de 1956 (Figuras 4 y 5). En el año 1995 se llevó a cabo un estudio de los sedimentos de la zona central de la Bahía, entre las isóbatas de 20 y 50 m, con la finalidad de estudiar su idoneidad de su uso para la regeneración de las playas (Tecnoambiente, 1995). El yacimiento analizado se encontraba entre el islote de Pallaret y la traza del emisario situado frente a la punta Xinxó. El sedimento en la zona de extracción estaba caracterizado por una granulometría de D50=0.39 mm y un porcentaje de fangos del 9%.





Figura 4. Ortofotografía del interior de la bahía Año 1956. La línea negra indica el límite de la playa seca. Fuente: Ofincar 2019.



Figura 5. Ortofotografías del interior de la bahía. Año 2018. Línea roja, playa actual; línea negra referencia 1956. Fuente: Ofincar 2019.

3.6 CARACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS DE LOS FONDOS MARINOS

Las comunidades bentónicas presentes en la Bahía de Sant Antoni se pueden clasificar en tres grandes categorías en función de su composición específica y de los tipos de sustrato (ver Tecnoambiente, 1995 e idelB, 2019; Fig. 6):

- Comunidad de sustrato sedimentario asociada a pradera de *Cymodocea nodosa* que principalmente se extiende en la zona norte del puerto. Esta comunidad no está muy bien reflejada en las cartografías existentes probablemente porque haya variado mucho su extensión a lo largo del tiempo.
- Comunidad de sustrato sedimentario asociada a pradera de *Posidonia oceanica* que se encuentra en la zona sur del puerto y se extiende con mayor o menor densidad hasta profundidades de entre 30 y 35m.
- Comunidad de sustrato sedimentario libre de cobertura vegetal asociada a diferentes modas granulométricas del sedimento.

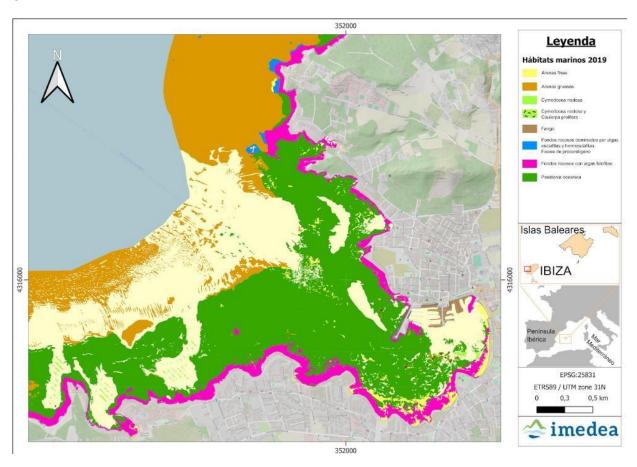


Figura 6. Hábitats marinos de la Bahía de Sant Antoni. Adaptado de idelB (2019)



Según Marbà et al. (2022) las praderas de *Posidonia oceanica*, situadas dentro del abrigo del puerto, presentan cierto grado de estrés producido por las condiciones ambientales. Las tasas de sedimentación de de materia orgánica y nitrógeno sobre las zonas interiores de la Bahía (puerto) pobladas por praderas de *P. oceanica*, superan los valores límite de sedimentación establecidos por Díaz-Almela et al. (2008) d'1,5 gDW m⁻² d⁻¹ para la materia orgánica y de 0,9 gDW m⁻² d⁻¹ de nitrógeno (Marbá et al 2022). Estos elevados valores sugieren que los aportes de origen terrestres de materia orgánica y de nutrientes (al menos de nitrógeno) al puerto afectan negativamente al crecimiento y la supervivencia de las praderas de *P. oceanica*.

La densidad de haces no es muy elevada, ya que los valores registrados a 5 m de profundidad se sitúan alrededor de los 600 haces·m⁻², y a 10 m alcanzan los ~370 haces·m⁻². La pradera de posidonia está fuertemente fragmentada y únicamente cubre el 53% de los fondos someros frente al 90% de cobertura en las zonas más profundas. Estos valores son similares a los reportados por Tecnoambiente (1995; ver Tabla 2). Es destacable que este último estudio no apreciaba diferencias significativas en el estado de las praderas cuando se comparan las fotografías de los años 1968, 1979 y 1990 (Tecnología Ambiental, 1994). En la comparativa, se observa el impacto de las zonas de borneo de los barcos fondeados a partir de 2001 (Figura 7). Por otro lado, el valor de biomasa de *Cymodocea* encontrado en la campaña de dicho estudio fue de (27,82 g·m⁻²), muy inferior a la biomasa valor medio indicado por Duarte y Chiscano (1999) para esta especie (146 g·m⁻²), y la densidad de esta especie también obtuvo valores muy bajos (649,03 ± 56,84 haces·m⁻²).

Tabla 2. Porcentajes relativos de superficies vegetales en función del rango de profundidad en la playa de la bahía de Sant Antoni (Tecnología Ambiental, 1994).

Rango prof.	Posidonia oceanica	Fotófilas	Pos. / Fot.	Caulerpa	Cau/Cvm	Arena	TOTAL
0 - 1m	0	31.72	0	15.8	0	52.47	6.68
1 - 2m	0	43.69	0	8.57	0	47,74	8,74
2 - 3m	1,63	51,88	0,99	5,25	2,41	37,83	11,35
3 - 4m	23.89	18.66	7.86	12.66	5.49	31,45	18,65
4 - 5m	53,73	1,23	2,47	19,79	1,95	20.83	12,41
> 5m	98,17	0.76	0.02	0.59	0	0.46	42,17
TOTAL	52.7	15.78	1.89	7.47	1.54	20.62	100

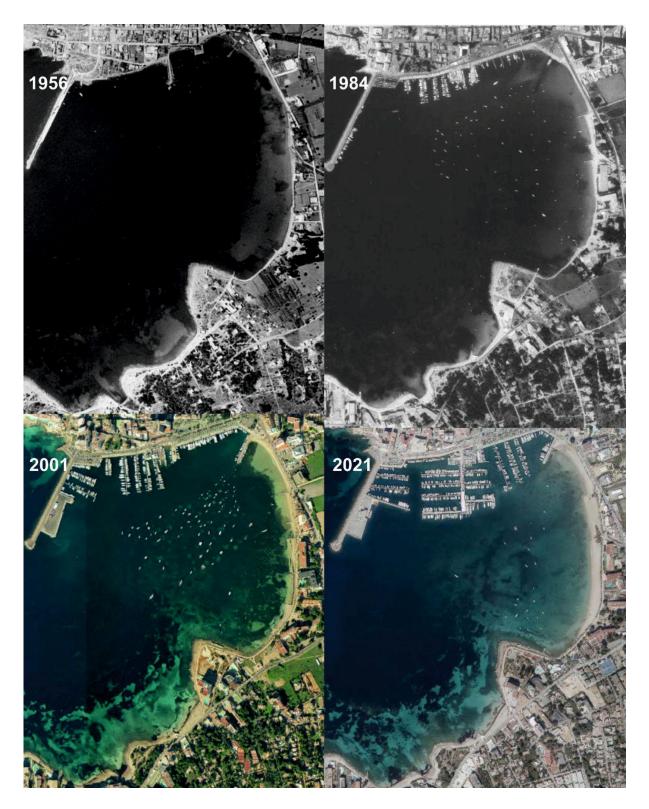


Figura 7. Comparativa de las ortofotos de los años 1956, 1984, 2001 y 2021 extraídas del visor idelB.



El Institut Menorquí d'Estudis (IME) y el Observatorio Socioambiental de Menorca (OBSAM) realizaron un estudio sobre la cartografía de los hábitats marinos de las Islas Baleares (Julià et al. 2019), en el que calificaron el estado de conservación del fondo marino de la Bahía como desfavorable-inadecuado. Según los autores del informe, esta clasificación se utiliza para situaciones en las que se requiere un cambio en la gestión o en las políticas existentes, pero donde no hay riesgo de elevado de desaparición del hábitat. Más recientemente, en el año 2020, DUNA consultores, realizó un estudio detallado de los fondos marinos del interior del puerto que concluye que en la zona norte existe un intenso proceso de sedimentación que ha ido transformando las comunidades originales de la Bahía.

3.7 ACTIVIDAD SOCIO-ECONÓMICA.

3.7.1 Población y actividad hotelera.

La bahía de Sant Antoni supone uno de los centros turísticos más importantes de Ibiza. El desarrollo hotelero comenzó en los años 30, con los hoteles *Portmany* y *Ses Savines* y pese a su ralentización a causa de la guerra civil, retomó con fuerza a partir de los años 50 y especialmente con el boom de la construcción de los años sesenta, cuando se desarrolló gran parte de la infraestructura turística del entorno de la bahía. En esta época se inició la industria del ocio nocturno y en los años 70 nació un nuevo concepto de música *chillout* con la inauguración del "Café del Mar". La actividad turística y recreativa es el sostén socioeconómico de la zona, promoviendo una fuerte presión urbanística. Además de los servicios que se prestan en tierra, existe una intensa actividad del sector náutico que abarca clubs de buceo, marinas y golondrinas, etc.

Sant Antoni de Portmany tiene una población de 27.431 habitantes (censo 2022 IBESTAT), con una renta municipal disponible de los hogares en el año 2019 de 15.099 €, inferior a la media de Ibiza, de 16.527€ (IBESTAT). El municipio abarca una superficie de 12.670,99 Ha (IBESTAT).

Sant Josep de sa Talaia tiene una población de 28.813 habitantes (censo 2022 IBESTAT) con una renta municipal disponible de los hogares en el año 2019 de 17.145 €, superior a la media de Ibiza, previamente mencionada. El municipio abarca una superficie de 15.885,41 Ha, incluidos los islotes (IBESTAT).

En la isla de Ibiza se estiman cerca de 58.000 plazas hoteleras disponibles en junio de 2024, aproximadamente 4.000 más que para el mismo mes en 2023 (IBESTAT). Durante los últimos 20 años (serie de datos del 2004 al 2022), el número total de alojamientos hoteleros incluyendo cualquier categoría ha rondado los 248, con una media anual de 38.267 plazas entre los dos municipios.

3.8 SANEAMIENTO URBANO

Las redes de saneamiento de Sant Antoni se concentran en el núcleo urbano y en la zona de Es Pouet (Figura 8). En el Plan Territorial Insular como principal problemática se destaca la falta de derivación de aguas pluviales o redes separativas y la insuficiencia de pozos de registro. Respecto del ámbito de actuación hay que añadir problemas motivados por el mal estado de algunos tramos de la red de saneamiento de más de 40 años de antigüedad situados en la zona de Dominio Público Marítimo Terrestre que dan lugar a atascos, malos olores y vertidos puntuales de aguas residuales y pluviales al mar, empezando a generar problemas medioambientales (Govern Illes Balears, 2020).

La EDAR de Sant Antoni de Portmany realiza un tratamiento terciario que posteriormente se vierte a través de un emisario que se extiende a lo largo de 1200 m desde el Caló d s'Oli aproximadamente el centro de la Bahía (Figura 9). El volúmen de agua tratado por esta depuradora es de 2.6 Hm3. La EDAR de Sant Josep más próxima a la Bahía se encuentra en las proximidades de la playa de Cala Tarida y da servicio a 17.590 habitantes. Los efluentes se vierten fuera de la Bahía.

Las descargas de pluviales se distribuyen a lo largo de toda la costa y, particularmente a lo largo del paseo de la parte interior de la bahía (Fig. 8). Algunas salidas de pluviales descargan sobre la línea de costa y en algunos puntos como Sant Antoni, es Pouet y S'Estanyol se han construido aliviaderos sumergidos que alejan los efluentes de la playa (Figura 9).

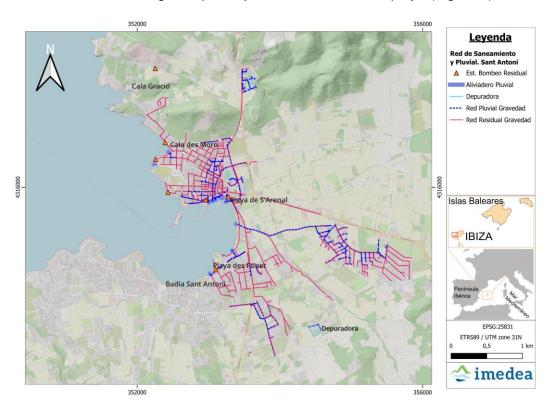


Figura 8. Redes pluviales y de saneamiento del municipio de Sant Antoni de Portmany.



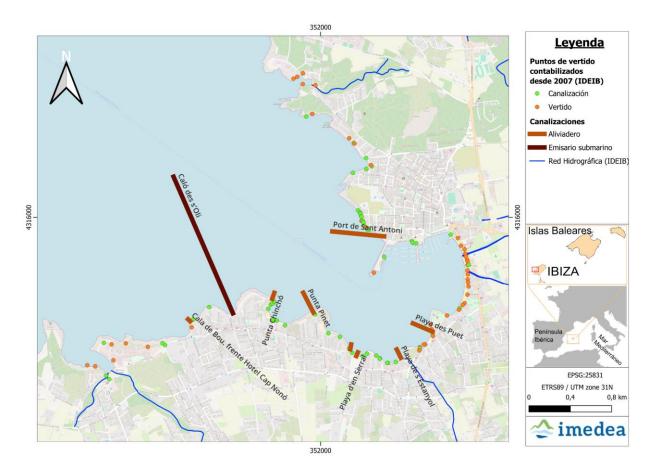


Figura 9. Puntos de vertido y aliviaderos en el interior de la Bahía de Sant Antoni. Fuente: idelB

3.8.1 Actividad portuaria.

El puerto de Sant Antoni de Portmany es el más próximo con la costa de la península ibérica. Dista aproximadamente 55 millas del de Denia en Alicante. Se trata de un puerto en el que se desarrolla actividad pesquera, náutico recreativa y mercantil. Según PortsIB (2020), la náutica recreativa ha tenido un intenso aumento en este puerto, siendo en la actualidad uno de los más visitados del Archipiélago Balear. Las infraestructuras del puerto están gestionadas una parte directamente por el Govern de les Illes Balears y la otra las gestiona el CN de Sant Antoni de Portmany.

Las Cofradías de pescadores de Ibiza y la de San Antonio suman un total de 80 socios, con una flota de 6 embarcaciones de arrastre (bou) y 55 de artes menores (llaüts). Los artes menores tienen como actividad preferente la pesca con redes atrasmalladas, que según la época del año alternan con la pesca de palangre, el bolitx o artet y algunas que se dedican a los artes de parada: soltas y morunas (Cofradía de pescadores de Sant Antoni, 2024).

La náutica de recreo es una actividad social y económicamente importante en la Bahía. Los amarres están gestionados por el ente público Ports-IB y por el Club Nàutic Sant Antoni (CNSA), asociación de carácter privado. Ports-IB gestiona un total de 369 amarres de embarcaciones náutico-recreativas de hasta 15m de eslora, de los cuales 86 se ubican en la zona oeste y 283 en la zona este. El CNSA ocupa la cara norte del interior de la bahía, abarcando una superficie de 14,5 Ha, es decir, 0,15 Km2. Cuenta con 578 amarres de hasta 50m de eslora y 5 m de calado, una gasolinera, servicio de recogida de aguas negras y de sentina, lavandería y servicio de rampa, entre otros.

Entre mayo y septiembre, el CNSA pone a disposición de todos los navegantes 71 boyas de fondeo ecológico en la bahía de Portmany, a poca distancia de los pantalanes. Esta zona de fondeo forma parte de la red de puertos de las Islas Baleares. Sin embargo, pese a los esfuerzos de los ayuntamientos por regular la presión de la náutica de recreo sobre los fondos marinos, la colocación de muertos de hormigón para el amarre de embarcaciones y el fondeo con ancla en las zonas protegidas del puerto son prácticas irregulares que se denuncian desde hace años. Según un estudio realizado por Calvo et al. (2018) la presión por fondeos recreativos se produce durante todo el verano, aunque es particularmente intenso durante el mes de agosto. Se estima que más de 40 embarcaciones fondean cada día en la Bahía de Sant Antoni durante esta época, muchas de ellas se concentran en la zona sur del puerto.

Además del tráfico correspondiente a las embarcaciones recreativas, son varias las empresas con actividades relacionadas con el medio marino (buceo, golondrinas, taxi-boat, alquiler de embarcaciones sin licencia, etc.) que suponen un tránsito intenso desde el puerto a toda una serie de muelles y embarcaderos existentes a lo lago de la costa sur. El dique para grandes buques fue construido en los años 50 y se operó con relativa intensidad hasta 2019 cuando se redujo el tráfico de grandes ferrys con la península. Según el informe de evaluación del tráfico comercial del puerto de Sant Antoni de Portmany (PortsIB, 2020), del total anual de pasajeros marítimos que transitan en la bahía de Sant Antoni, sólo el 25% corresponde a transporte regular, siendo el restante 75% un tráfico mucho más intensivo y temporal como el de las golondrinas, los chárteres o la navegación recreativa.

3.9 FIGURAS DE PROTECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La parte externa de la Bahía de Sant Antoni está incluida en la zona de especial protección para las aves ZEPA ES0000516 del Espacio Marino del Poniente y Norte de Ibiza, tal como se indica en la figura 10. La superficie total de la ZEPA es de 47.162,02 hectáreas, y limita con una zona costera rocosa y muy acantilada, a excepción de la bahía de Sant Antoni y su entorno, donde la deposición de materiales de los ríos ha conformado una amplia llanura.

El Decreto 49/2022 de 5 de diciembre aprobó el Plan de Gestión Natura 2000 Costa Oeste de Ibiza deriva en la creación de la demarcación marina LEBA (levantino-balear).





Figura 10. Espacio Marino del Poniente y Norte de Ibiza. La línea naranja delimita la ZEPA ES0000516. FUENTE: EU DOPA explorer.

Al estar integrados en la Reserva Natural des Vedrà, es Vedranell y els Illots de Ponent, los islotes de poniente cuentan con la máxima protección. Este territorio está incluido en la Red Natura 2000 y por tanto cuenta con las figuras de protección LIC (Lugar de Importancia Comunitaria) y ZEPA (previamente mencionada), además de la autonómica ANEI (Área Natural de Especial Interés).

Las praderas de *Posidonia oceanica*, presentes en la bahía de San Antonio, se encuentran integradas en la Declaración de Ibiza como Patrimonio de la Humanidad de 1999. La legislación balear le otorga un elevado grado de protección, que, entre otras cosas, impide fondear sobre ella, ya que las anclas y las cadenas provocan graves daños en su masa vegetal (Decreto 25/2018 de 27 de julio sobre la conservación de la *Posidonia oceanica* en las Islas Baleares).

3.10MARCO LEGAL

Las aguas de la Bahía de Sant Antoni, de las que gozan principalmente los municipios de Sant Antoni de Portmany y Sant Josep de sa Talaia y su entorno están reguladas por la siguiente normativa y ámbito competencial:

- La Comunidad Autónoma de las Islas Baleares tiene, de acuerdo con el artículo 30.46 del Estatuto de Autonomía (aprobado por la Ley Orgánica 1/2007, de 28 de febrero), competencia exclusiva en materia de protección del medio ambiente, ecología y espacios naturales protegidos.
- Ley 22/1988, de 23 de julio, de Costas (BOE 19.07.1988)
- Directiva 92/43/CEE, de 21 de mayo, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres.
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. (Directiva Marco del Agua o DMA).
- Orden FOM/1144/2003, de 28 de abril, por la que se regulan los equipos de seguridad, salvamento, contra incendios, navegación y prevención de vertidos por aguas sucias, que deben llevar a bordo las embarcaciones de recreo.
- Ley 5/2005, de 26 de mayo, para la conservación de los espacios de relevancia ambiental (LECO).
- Ley 11/2006 de 14 de septiembre, de evaluaciones de impacto ambiental y evaluaciones ambientales estratégicas en las Islas Baleares.
- Calidad de aguas de baño Real Decreto 1341/2007, de 11 de octubre es consecuencia de incorporar a la legislación española la Directiva 2006/7/CE del Parlamento Europeo y Consejo, de 15 de febrero, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño. Directiva 2009/147/CE relativa a la conservación de las aves silvestres.
- Ley 42/2007, de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad
- Cymodocea nodosa y Posidonia oceanica, fanerógamas incluidas en el Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial del Catálogo Balear de Especies Protegidas (Decreto 75/2005, de 8 de Julio) y del Listado Nacional (Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero) y en Anexo I del Convenio de Berna de 1979.
- Ley 14/2014, de 24 de julio, de Navegación Marítima.
- Real Decreto 876/2014, de 10 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento General de Costas.



- Decreto Ley 1/2015, de 10 de abril, por el que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica para la demarcación hidrográfica intracomunitaria de las Islas Baleares.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.
- Decreto 25/2018, de 27 de Julio, sobre la conservación de la Posidonia oceanica en las Islas Baleares prohibición de fondear sobre Posidonia sin importar la eslora de la embarcación. Este Decreto supuso un desarrollo de la Ley 5/2005, de 26 de mayo, para la Conservación de los Espacios de Relevancia Ambiental (LECO), en tanto buena parte de la Posidonia se encuentra en espacios de la Red Natura 2000, cuya gestión corresponde a la Comunidad Autónoma.
- Decreto 46/2001 de 30 de marzo, de aprobación definitiva del Plan Director Sectorial para la gestión de residuos urbanos en Ibiza y Formentera. Los productores de residuos, ya sean procedentes de las embarcaciones, locales comerciales, talleres o usuarios de las instalaciones, serán responsables de su gestión y deberán cumplir con la normativa de gestión de residuos.
- Decreto 10/2000 de 4 de febrero (artículo 2) y la Orden de la Consellería de Medi Ambient de 28 de febrero de 2000. Los residuos de construcción y demolición deberán tratarse de acuerdo con lo establecido en el artículo 2 de este decreto.
- Capítulo IV del Título III de la Ley 20/1986, de 21 de abril, de residuos, por la que deberán tratarse los residuos peligrosos.
- Normas ISO 9001 de Calidad, ISO 14001 de Medioambiente e ISO 45001 de Seguridad y Salud Laboral, además de la certificación Q de Calidad del Instituto para la Calidad Turística Española. El Club Nàutic Sant Antoni tiene implantado un Sistema de Gestión Integrado, que se basa en la adecuación de sus instalaciones, organización y protocolos.
- Plan de huella de carbono basado en el análisis, cálculo, reducción y compensación de emisiones de gases invernadero, certificación mediante ISO 14064 (CNBS)

En la Figura 11 se indican las diferentes figuras de protección de las zonas adyacentes al área de estudio que están recogidas en legislación anteriormente listada. Se puede observar que la zona interior de la Bahía y el puerto están excluidos de las distintas figuras de protección.

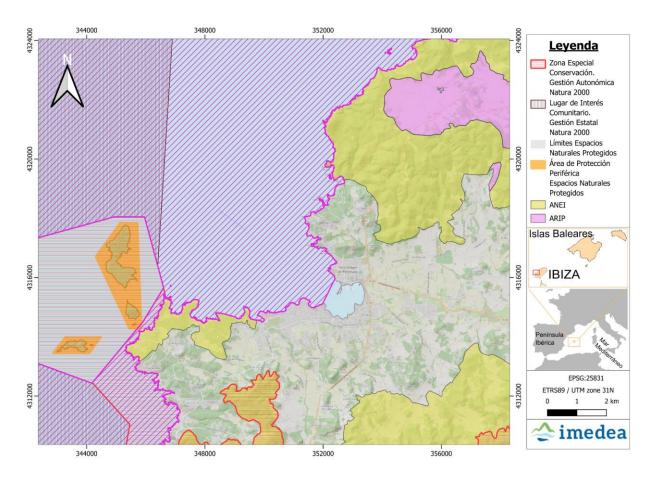


Figura 11. Delimitación de las distintas zonas de protección que afectan a la Bahía de Sant Antoni.



4.FACTORES QUE INCIDEN SOBRE LA TURBIDEZ Y CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE LAS AGUAS

La turbidez de las aguas costeras, una medida de las propiedades ópticas del agua, está determinada por la materia particulada en suspensión o SMP y por los solutos orgánicos disueltos en el agua, fundamentalmente el material coloreado disuelto (CDOM). La presencia de turbidez de las aguas costeras influye en varios procesos ecológicos y físicos. La turbidez genera atenuación de la luz en la columna del agua, condicionando la fotosíntesis de los productores primarios tanto pelágicos como bentónicos (fitoplancton, algas, fanerógamas, etc). Esto, a su vez, afecta en distintos grados los organismos que configuran las redes tróficas costeras.

La materia orgánica disuelta coloreada (CDOM), también conocida como gelbstoff o sustancia amarilla, puede desempeñar eventualmente un papel importante, si bien, su concentración no es elevada en Baleares. Este tipo de compuestos son importantes en áreas con un alto aporte fluvial o durante períodos de fuertes lluvias durante los cuales se descargan grandes cantidades de materia orgánica a la zona costera. La CDOM está compuesta de moléculas orgánicas derivadas principalmente de descomposición de material vegetal terrestre, aunque la descomposición de algas y fanerógamas puede ser puntualmente importante. En Baleares se suele identificar por el color amarillento de las aguas en zonas de descomposición de hojarasca de posidonia.

El SMP representa uno de los principales componentes ópticos de las aguas costeras y afecta sustancialmente ciertos atributos del ambiente fisicoquímico, a menudo condicionando la productividad primaria y otros procesos ecológicos claves. Por ejemplo, el SMP aumenta la atenuación de la luz mediante la absorción y la dispersión limitando la profundidad de la zona fótica, que es la capa con luz disponible para el proceso de fotosíntesis. El SMP consiste en una mezcla de sedimentos inorgánicos, detritos orgánicos y biota (microorganismos). Estas partículas se originan de una variedad de fuentes, incluyendo los aportes fluviales, la erosión costera y las actividades antropogénicas como el dragado o la construcción. Cuando se descargan grandes cantidades de sedimentos en el agua, especialmente durante tormentas o lluvias intensas, o cuando se resuspende el material depositado en el lecho marino, se reduce la penetración de la luz, lo que conduce a niveles más altos de turbidez. La densidad y la composición de estas partículas pueden variar, pero el limo fino, las arcillas y la materia orgánica tienden a permanecer suspendidos durante períodos prolongados, lo que exacerba la turbidez.

El fitoplancton, los organismos fotosintéticos microscópicos que habitan en las aguas, desempeñan un papel fundamental en la turbidez de las aguas en regiones en las que los aportes terrestres son escasos. Si bien el fitoplancton es esencial para los ecosistemas costeros, ya que forma la base de las redes tróficas marinas, su influencia en la turbidez subraya el delicado equilibrio necesario para mantener la calidad del agua.

En zonas costeras en las que los nutrientes procedentes de fuentes como la escorrentía agrícola o la descarga de aguas residuales son abundantes, se crean condiciones favorables para el crecimiento masivo del fitoplancton, lo cual genera atenuación de la luz en la columna de agua.

En las regiones costeras de Baleares, la turbidez del agua suele ser el resultado de una interacción compleja entre la materia particulada de origen mineral y orgánico (o tripton) y el fitoplancton. Por ejemplo, durante períodos de alto aporte de sedimentos a través de los torrentes, el aumento de la turbidez puede limitar la disponibilidad de luz, suprimiendo temporalmente el crecimiento del fitoplancton. Por el contrario, durante las épocas de baja escorrentía la disponibilidad de nutrientes procedentes de las filtraciones de acuíferos costeros puede estimular las floraciones de fitoplancton, lo que agrava el problema de la turbidez. Estos equilibrios están condicionados por la dinámica marina costera que, en el litoral, está condicionada por las corrientes y el oleaje que determinan los procesos de dispersión y acumulación de las partículas.

4.1 APORTES TERRESTRES: HIDROGEOLOGÍA E HIDROQUÍMICA

El estudio de las aguas subterráneas engloba tanto la evaluación de su cantidad como su calidad. Estos análisis son necesarios para conocer las posibilidades de uso de estas aguas, asegurando la sostenibilidad del recurso (por ejemplo, estimar los caudales ecológicos necesarios para asegurar el mantenimiento de los ecosistemas que se nutren de las aguas subterráneas). Además, es fundamental conocer las características químicas del agua (calidad) vinculadas a la hidrogeología. Esta información ayuda a relacionar su composición, distribución y circulación a través de los materiales geológicos que componen los acuíferos.

La velocidad a la que se mueve el agua es frecuentemente mucho más lenta que la velocidad de las reacciones químicas; lo que permite que se establezca un equilibrio químico relativamente rápido (aunque no siempre es así, lo que nos llevaría a considerar otras metodologías de análisis). En este sentido, los procesos Redox (procesos de reducción-oxidación) son relevantes en la disminución de la contaminación, principalmente productos orgánicos y nitrogenados. Estos procesos se realizan mayoritariamente durante la infiltración en el suelo (medio no saturado); aunque también pueden producirse en el medio saturado (acuífero). En ambos procesos (oxidación y reducción), las bacterias y otros microorganismos del terreno juegan un papel muy importante.



4.1.1 Hidrogeología

El análisis hidrogeológico se ha realizado a partir de los datos proporcionados por la Dirección General de Recursos Hídricos siguiendo la metodología y limitaciones indicadas en la sección de metodología. Cabe señalar que en el Plan Hidrológico de las Islas Baleares 2015-2021 se cita que la masa de agua subterránea de Pla de Sant Antoni 2002M2 tiene autorizados 175 pozos, con un volumen total autorizado de extracción de agua que asciende a 1.167.562 m³/año. Esto supone un porcentaje de explotación del 118.47%, lo que hace que se catalogue el estado de esta masa de agua de "Malo".

En general, los niveles piezométricos no presentan grandes fluctuaciones y no se observan niveles inferiores al nivel del mar (Fig. 12). Sin embargo, ciertos puntos de control presentan grandes oscilaciones. Específicamente:

- El0007 y El0314 presentan fluctuaciones de 3 a 6 metros respectivamente.
- Los puntos El0179, El0298, El0163, El007 y El0183 presenta descensos notables en los años previos al covid, pero sus niveles parece que se recuperan
- Los puntos El046, El0392 y El031 presentan tendencias negativas
- El punto El0307 descenso abrupto: de 5 a 0.3 metros sobre el nivel del mar
- El punto El027 actualmente estable, antes grandes oscilaciones (30 metros sobre el nivel del mar)

En las medidas más recientes (2016-2021), se observan ligeras variaciones, a excepción del punto El307 (Fig. 12). Este punto de registro se sitúa en una zona agrícola en la carretera de Ca la Bassa y presenta grandes oscilaciones en los últimos registros.

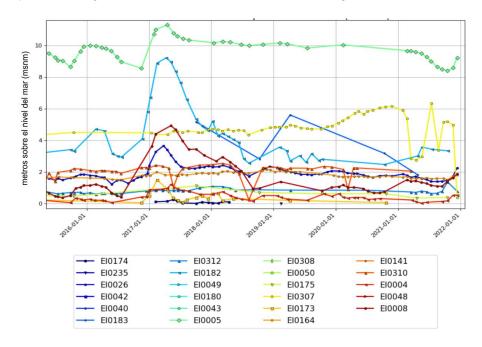


Figura 12. Evolución local de los niveles piezométricos en pozos de la cuenca hidrográfica de Sant Antoni durante el periodo 2016-2021.

4.1.2 Hidroquímica de las aguas subterráneas

Los datos disponibles se distribuyen de manera heterogénea, encontrándose la mayoría de datos en zonas alejadas de la bahía de Sant Antoni.

Con la información recibida se realizan las siguientes hipótesis para un análisis inicial:

- CE está en mS/cm;
- la temperatura es de 20°C para todos los puntos

A pesar de presentar bajas oscilaciones en los niveles piezométricos descritas en el capítulo anterior, el tipo de aguas ha variado a lo largo de los años. Las aguas subterráneas en la zona durante el año 2021 son del tipo bicarbonatadas clóricas - magnésicas (Figura 13 y Figura 14). La evolución de los principales cationes y aniones se representa a partir de los diagramas de Stiff (Figura 14). Los valores de los elementos mayoritarios se encuentran en valores bajos, mientras que los valores de cloruros presentan valores altos.

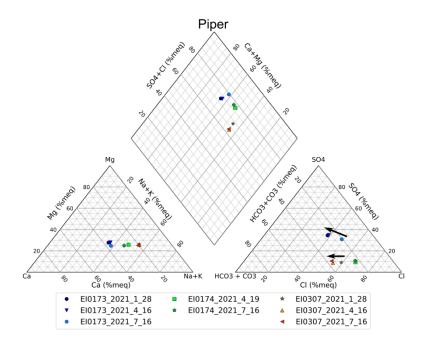


Figura 13. Diagrama de Piper de los más cercanos a la Bahía de Sant Antoni con datos disponibles. Se aprecia una disminución de las concentraciones de cloruros y aumento de sulfatos en los puntos El0173 (Can Pere March I) y El0307 (Mestre Sa Bassa).



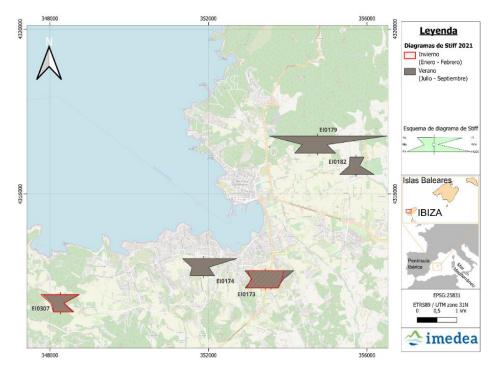


Figura 14. Mapa de diagramas de Stiff de las campañas más actuales del año 2021. Todos los puntos, excepto el punto El0182, presentan valores muy altos de cloruros. Los puntos El0307 y El0173 presentan datos en invierno y verano; siendo este último punto el que más oscilación estacional presenta de los 2 puntos.

Dada la poca representatividad de la calidad de las aguas subterráneas en la zona (no se disponen de datos de la zona en el mismo rango de tiempo), se describe la evolución de los parámetros más relevantes.

4.1.2.1 Conductividad eléctrica

En general, los valores de conductividad son inferiores a los 2 mS/cm (2000 μ S/cm, a 20°C). Según el real decreto 3/2023, estos valores se encuentran dentro del rango de seguridad, exceptuando el punto El0179. Este punto presenta valores por encima del valor admisible (4 mS/cm, 4000 μ S/cm) (Fig. 15). Es necesario mencionar que este parámetro indica una mayor o menor concentración de sales disueltas en el agua, no representa la calidad del agua para abastecimiento. Para ello es necesario considerar además otros parámetros orgánicos, como análisis bacteriológicos y de compuestos orgánicos.

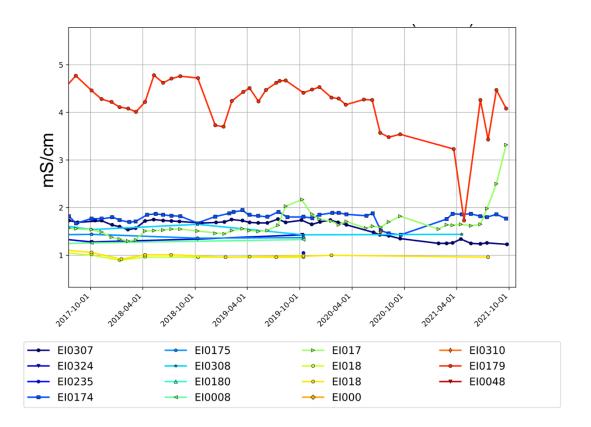


Figura 15. Evolución de la conductividad eléctrica. Al no disponer de unidades asociadas a este parámetro, se ha supuesto valores en mS/cm. El punto El0179 presenta valores muy altos, mientras que los demás puntos de control cercanos a la bahía de Sant Antoni, presentan valores que oscilan entre 1-2mS/cm.

Por otro lado, las conductividades eléctricas junto con el índice SAR (Sodium Adsorption Ratio) se encuentran en rangos de conductividad alto-muy alto 3000-4000 μ S/cm y bajo contenido de sodio con respecto al contenido de calcio y magnesio (Figura 16). SAR es un parámetro de calidad del agua de riego utilizado en la gestión de los suelos afectados por el sodio. Es un indicador de la idoneidad del agua para su uso en el riego agrícola y permite identificar el riesgo de sodicidad de un suelo.



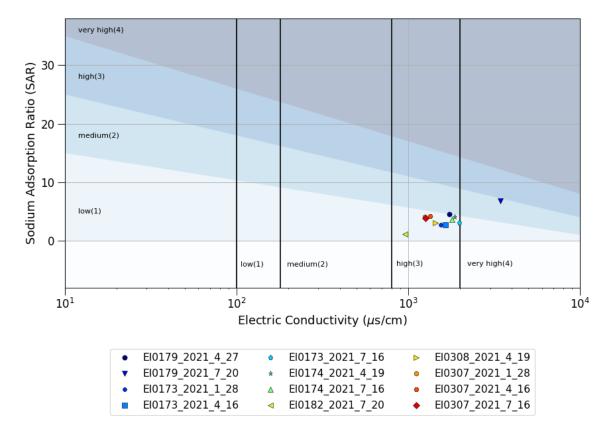


Figura 16. Diagrama SAR vs conductividad eléctrica de los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni de las muestras analizadas durante el 2021.

4.1.2.2. Cloruros

Por lo que respecta a la alta concentración de cloruros, los puntos medidos superan los valores límite aptos para el suministro (250 mg/l, Real Decreto 3/2023), en particular los puntos El0179 (Can Micolau) y El0173 (Can Pere March I) (ver Fig.17). Esa alta concentración probablemente puede ser debido a la posición de estos puntos de muestreo respecto a la zona de mezcla de agua dulce y salada (intrusión salina). Los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni con información hidroquímica se encuentran a 1 kilómetro aproximadamente de la línea de la costa.

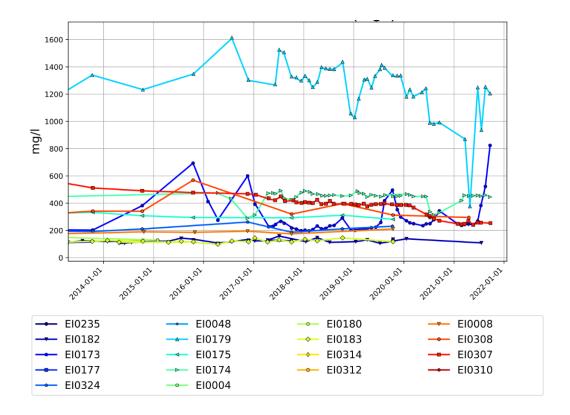


Figura 17. Evolución de concentración de cloruros de los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni. Se aprecia un aumento de sus concentraciones en los puntos El0179 (Can Micolau) y El0173 (Can Pere March I).

La intrusión de agua salada, o marina, es el movimiento permanente o temporal del agua salada a través del acuífero y tierra adentro. Dada su mayor densidad, ésta desplaza el agua dulce (Figura 18). Una captación (por ejemplo, pozo de abastecimiento) en un acuífero costero se saliniza cuando su porción activa se ve afectada por la zona de mezcla o por la propia agua salada. En este sentido, una mezcla de aguas con una fracción pequeña de agua salada (aproximadamente de 3-4%) añade entre 600 y 800 ppm (partes por millón) de cloruros al agua dulce original, lo que en general supone que esta mezcla de agua resultante tenga una salinidad muy alta y, por lo tanto, no sería apta para la mayoría de usos (FCIHS, 2009). Así, durante periodos con más necesidad de agua en la región, la zona de mezcla entre agua salada y dulce puede ser captada por estos puntos incrementando la salinidad de las aguas subterráneas y atrayendo agua salobre tierra adentro.



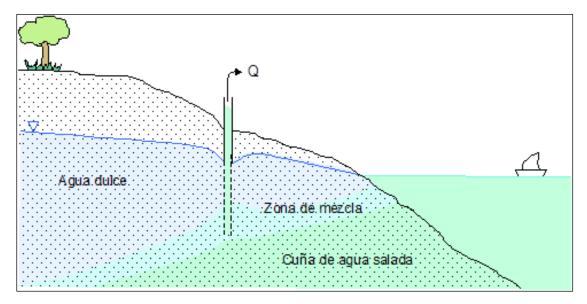


Figura 18. Esquema de intrusión marina y cómo las extracciones de agua subterránea pueden aumentar la intrusión y salinizar estos pozos (FCIHS, 2009).

Los puntos analizados presentan unas concentraciones altas en sodio, cloro y bicarbonatos; pero muy diferente en los demás compuestos, como se puede observar en el diagrama Schöeller-Berkalof (Fig. 19). Estas últimas variaciones pueden ser debidas a reacciones redox.

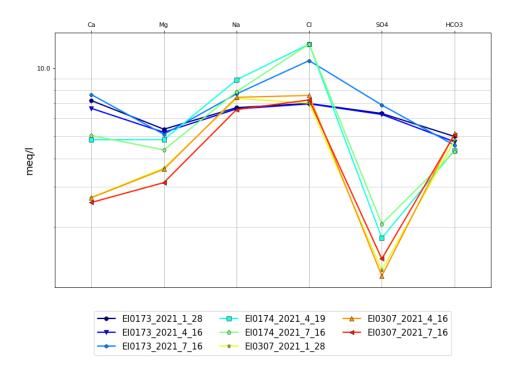


Figura 19. Diagrama Schöeller-Berkaloff. Relaciona los patrones de composición de las aguas muestreadas. Se aprecia la alta influencia del sodio y cloruros en su composición.

4.1.2.3. Nitratos

Los niveles naturales de nitratos en las aguas subterráneas son generalmente muy bajos (típicamente menor de 10 mg/l NO₃), pero los niveles de concentración de nitratos crecen a causa de las actividades humanas, como la agricultura, la industria, efluentes domésticos, emisiones de motores de combustión, etc. A partir de los datos disponibles, sólo el punto E10008 contiene concentraciones más altas de nitratos que el valor de 50 mg/l que establece el Real Decreto 3/2023 pare el consumo y suministro (Fig. 20).

Los puntos cercanos a la Bahía presentan pocas oscilaciones de nitratos con tendencias ligeramente crecientes, en particular los puntos El0173 (Can Pere March I), El0174 (Can Joan Bernat) y El0307 (Mestre Sa Bassa) situados en la zona sur del puerto. Espacialmente, estas concentraciones se pueden ver en las Figura 21 y Figura 22.

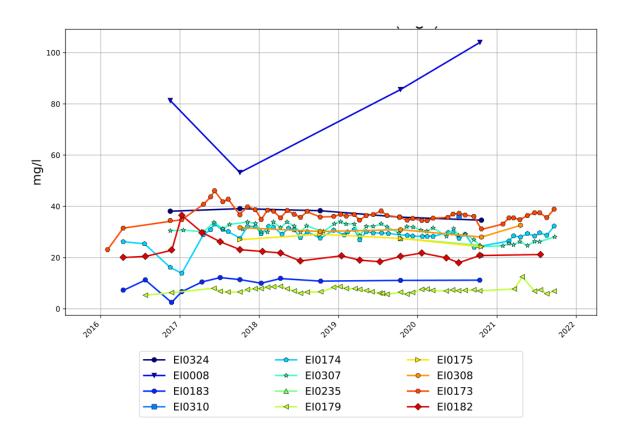


Figura 20. Evolución de nitratos (2016-2021). El punto El008 (X-5 Noria Es plà) presenta valores crecientes que se dejaron de monitorizar en 2019.



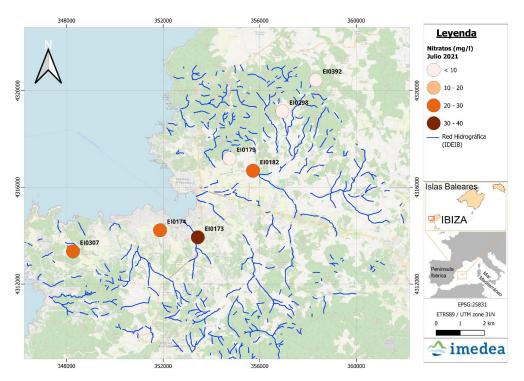


Figura 21. Concentración de nitratos en julio de 2021. Los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni presentan concentraciones superiores a los 20 mg/l.

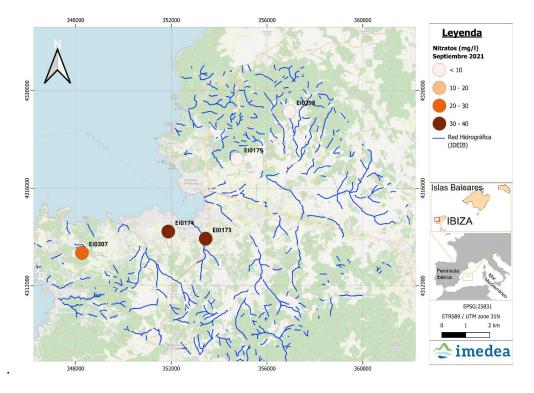


Figura 22. Concentración de nitratos en septiembre de 2021. Los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni presentan concentraciones superiores a los 20 mg/l.

A partir de la relación Cl y Na (Figura 23) de todos los datos disponibles de los puntos cercanos a la bahía de Sant Antoni:El0173 (Can Pere March), El0174 (Can Joan Bernat), El0179 (Can Micolau), El310 (Casa Lima) y El0307 (Mestre Sa Bassa), se puede tener una primera idea del origen de estas concentraciones. La relación 1:1 indicaría que el aporte de cloruros y sodio es de origen marino. Los datos disponibles muestran una desviación de la recta de agua marina, indicando que existe un aporte adicional de cloruros en la zona, además de los de origen marino. A partir de la Figura 23, las concentraciones de cloruros presentan un comportamiento similar al de la Conductividad Eléctrica (CE, Figura 15); lo que lleva a plantear la hipótesis de que dichas concentraciones tienen el mismo origen.

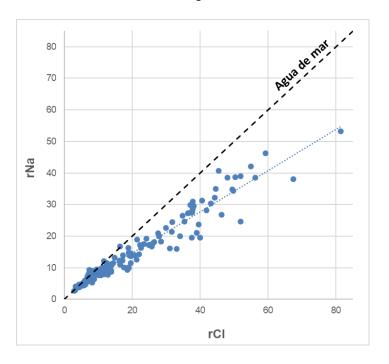


Figura 23. Distribución de Cloruros y Sodio (mg/l) de los datos disponibles en los puntos más cercanos a la bahía de Sant Antoni (El0173, El0745, El0307, El0310). Su distribución indica un aumento de cloruros, principalmente por un aporte de agua de mar (intrusión salina).

Existe una gran variedad de posibles orígenes de los contaminantes, por lo que resulta complicado definir la causa de la contaminación. Sin embargo, el análisis de la relación cloruronitrato brinda una primera idea de los orígenes más comunes de contaminación, los cuales representan principalmente entradas de contaminación desarrolladas por la actividad humana. Las actividades que mayor concentración de nitratos generan son las aguas de abastecimiento urbano poco mineralizadas, zonas de irrigación (debido principalmente a la preparación del campo con abonos y fertilizantes para aumentar la producción de la siembra), y aguas residuales (BGC, 2003, extraído de FCHIS, 2009). La relación NO₃/Cl del muestreo realizado en los puntos cercanos a la bahía de Sant Antoni (Figura 24) muestra una mezcla de orígenes antrópicos de estos compuestos, indicando una ligera evolución estacional. Estas entradas adicionales son coherentes con la Figura 23, que indica un exceso de cloruros con respecto al sodio si se tratase de origen exclusivamente marino.



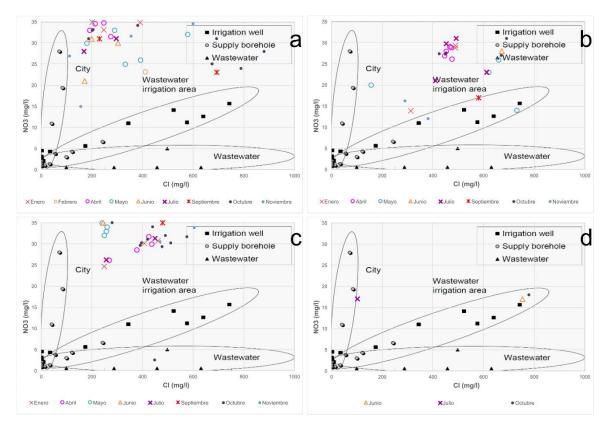


Figura 24. Relación cloruros (CI) - nitratos (NO3) en relación a estudios previos de origen de las aguas muestreadas en los puntos EI0173 (a), EI0745 (b), EI0307 (c) y EI0310 (d). (fondo de la figura: BGS, 2003. Extraído de FCHIS, 2009). Esta comparación da una primera idea de la posible mezcla de aguas de origen antrópico, principalmente de abastecimiento urbano y aguas de irrigación.

4.1.2.4 Establecimiento de causalidad en la contaminación del acuífero: natural / antrópico

En general la calidad del agua subterránea muestreada es buena teniendo en cuenta los elementos analizados. Esto no significa que no existan otros contaminantes no analizados. Con la información disponible, el conocimiento del origen de la composición hidrogeoquímica (calidad) de las aguas muestreadas es escaso. Los valores medidos presentan valores comunes a una zona costera con baja-media explotación de los acuíferos. Sin embargo, a partir de la información de los niveles piezométricos se puede concluir que existen explotaciones que modifican localmente el flujo natural del agua subterránea hacia el mar (i.e., El0173, Can Pere March), generando depresiones hidráulicas que van acompañadas de un incremento de la conductividad eléctrica por aumento de sales marinas. Dada la heterogénea distribución de los niveles piezométricos, no es posible crear una piezometría estacional. Sin embargo, a partir de los descensos piezométricos observados en la Figura 12, se puede inferir que estas explotaciones generan temporalmente conos de bombeo que acentúan localmente la intrusión salina.

La evolución de las concentraciones de Cloruros (CI) presenta un comportamiento muy similar al de la conductividad eléctrica (CE). Este comportamiento junto con la relación de cloruros - sodio (Fig. 23) y cloruros – nitratos (Fig. 24), sugiere que las altas concentraciones de estos compuestos se derivan de la actividad antrópica en la zona. La Figura 24 proporciona información sobre el origen del Cl y NO₃ que es atribuible a la contaminación por aguas residuales (posiblemente por pérdidas de la red de alcantarillado) y por el uso de fertilizantes en zonas de irrigación. Sin embargo, esta hipótesis tiene un alto grado de incertidumbre debido a las posibles reacciones entre el agua subterránea y los materiales geológicos que atraviesa el agua durante su curso hacia el mar y los posibles focos de contaminación existentes en la zona. Lo más plausible sería inferir que la variación estacional de la explotación del acuífero para abastecimiento y/o irrigación genera un aumento de la concentración de cloruros, como se puede observar a partir de la relación Na/Cl de la Figura 23. Las concentraciones elevadas de nitrato en algunos puntos también pueden ser indicativas de contaminación de origen agrícola o por contaminación de aguas residuales, que eventualmente descargan en el mar.

4.1.2.5 Disponibilidad de nutrientes inorgánicos en las aguas costeras

Los nutrientes inorgánicos en las aguas de la Bahía son en general bajos (0.55±0.72, 0.03±0.03 y 1.10±0.4μM respectivamente para el NOx, PO4 y SiO3), si bien, algunas estaciones en el interior del puerto presentan concentraciones más elevadas de nitrato (0.5 a 0.7 μM) y particularmente de amonio (hasta 6.8 μM). Estos valores más elevados, indicativos de aportes terrígenos, corresponden a estaciones someras (< 5 m de profundidad) pero no presentan una clara distribución espacial por lo que se atribuyen a fuentes difusas o a descargas muy puntuales en el interior del puerto que no pueden ser resueltas mediante el muestreo realizado.

4.2 DINÁMICA COSTERA

4.2.1 Condiciones meteorológicas y clima marítimo

Climatológicamente la zona de estudio es templada y seca. La temperatura atmosférica de la zona oscila entre los 8 y los 30°C (media 18.4±6.2°C) y la precipitación anual media es de 413 mm/año (Figura 25 AEMET, Ibiza aeropuerto). La bahía y puerto de San Antoni están protegidos de los vientos más fuertes y de las olas altas resultantes. La configuración de la costa la protege de manera efectiva de las condiciones más intensas que proceden del primer y tercer cuadrante (NE y SW).

Las condiciones más intensas durante la temporada de invierno se limitan a tres situaciones de viento principales: vientos Mistral-Tramontana, que llegan a Ibiza como vientos del NO-N, vientos Cierzo, que rara vez llegan a Ibiza como fuertes vientos del noroeste, y vientos del suroeste. Los registros del aeropuerto de Ibiza indican que el sudoeste es la dirección



predominante del viento durante el invierno, con una velocidad de 8-10 m/s (Fig. 26). Los vientos de tramontana son menos frecuentes e intensos que en Menorca y Mallorca. Ibiza experimenta vientos del noreste unas cuatro veces cada invierno. Las velocidades del viento suelen oscilar entre 8 y 10 nudos, pero pueden ocasionalmente alcanzar los 15 m/s. Como el puerto está en el lado oeste de la isla, abrigado por la costa norte, las olas generadas por este tipo de vientos no inciden especialmente en la agitación portuaria. Los vientos intensos del suroeste ocurren una o dos veces al año. Están asociados con sistemas de baja presión que se mueven a través del estrecho de Gibraltar antes de moverse al noreste a lo largo de la costa levantina. Su efecto sobre la zona interior del puerto se minimiza debido a la configuración de la bahía. Sin embargo, este tipo de vientos pueden generar olas de período muy corto que favorezcan la resuspensión de sedimentos. En marzo, más del 38% del viento proviene del suroeste o del oeste, con velocidades promedio de unos 15m/s. Las precipitaciones que acompañan a los vientos del suroeste continúan hasta mayo, después de lo cual la lluvia se vuelve menos común.

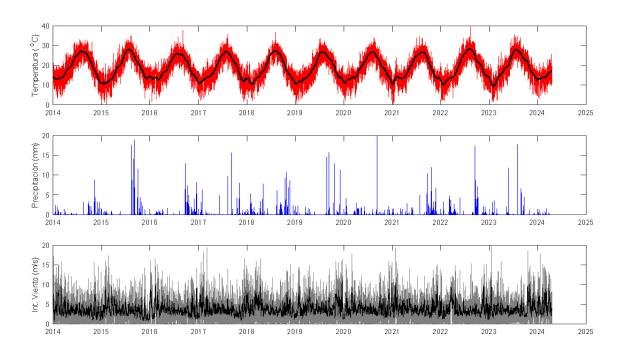


Figura 25. Serie temporal de temperatura atmosférica, precipitación e intensidad de viento en el Aeropuerto de Ibiza para el periodo 2014-2024. Datos AEMET.

El verano se caracteriza por una brisa marina diaria que se hace evidente a partir de mayo. La brisa marina suele comenzar alrededor del mediodía y dura hasta el atardecer. En el aeropuerto, la brisa tiene una dirección SW, con una velocidad media de unos 5m/s, sin embargo, la dirección dada por la estación meteorológica Galfi situada en el margen meridional de la Bahía de San Antoni (Lon. 1.219 °E Lat. 38.951 °N) indica que la dirección de la brisa se desvía unos 12° hacia el sur respecto a los registros del Aeropuerto (Fig. 27).

El suroeste es la segunda dirección del viento más común. La temporada de tormentas de verano a otoño comienza a fines de agosto y continúa hasta septiembre. Es durante este período que ocurren las tormentas más fuertes del año. Los vientos predominantes cambian de este a oeste después de octubre. La brisa marina todavía se siente hasta octubre, pero comienza más tarde, alrededor del mediodía.

La temporada húmeda se extiende entre septiembre y mayo siendo noviembre el mes más húmedo con un promedio de 7,5 días >1 mm de precipitación. Con algunas excepciones, los eventos con precipitaciones >10mm/día ocurren durante el otoño (Fig. 25). En promedio, las precipitaciones >10mm/día ocurren 10.4 veces al año y 3 veces al año exceden los 25 mm/día.

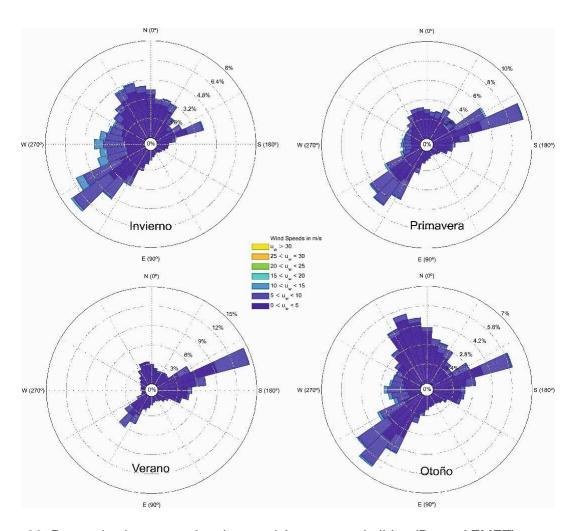


Figura 26. Rosas de viento estacionales en el Aeropuerto de Ibiza (Datos AEMET).



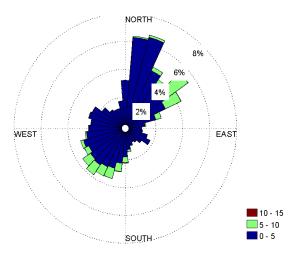


Figura 27. Rosa de viento para el periodo Mayo-Julio 2024 en la Bahía de San Antoni (Lon. 1.219E Lat. 38.951N, Datos SOCIB)

En consonancia con el forzamiento eólico y la geomorfología de la costa, los oleajes más intensos (Hs=3-4m) proceden del norte. Si bien las zonas más occidentales de la Bahía puedan estar expuestas a este tipo de oleaje, su incidencia sobre la zona interior de la bahía es baja. El puerto se encuentra expuesto a oleajes procedentes del oeste que ocurren con mayor frecuencia durante el otoño e invierno (Fig. 28). Sin embargo, la altura del oleaje no suele exceder los 2 m.

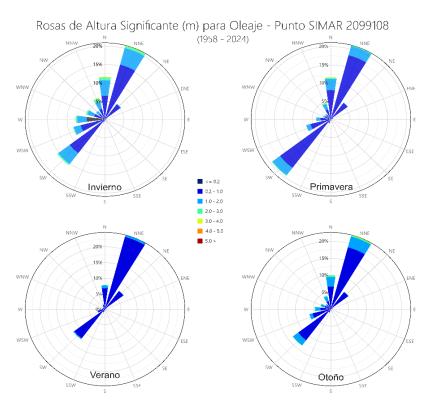


Figura 28. Rosas estacionales de oleaje (altura significante, m) en el punto SIMAR 2099108 situado en la Bahía de San Antoni (1.25 oE, 39.00 oN). Puertos del Estado.

4.2.2 Nivel del mar y corrientes

Al igual que en el resto del Mediterráneo occidental, en Sant Antoni la marea astronómica es semidiurna con un rango de marea micromareal (~20 cm, Fig. 29). Sin embargo, el nivel del mar puede variar en hasta 40 cm por efectos meteorológicos. El registro de nivel del mar obtenido durante el estudio muestra la marea y una intensificación en las variaciones de nivel del mar asociada a pulsos de viento. De hecho, el espectro de las variaciones de nivel del mar revela un pico a 18h y uno secundario a 9 h, correspondientes al periodo inercial y a un armónico de éste.

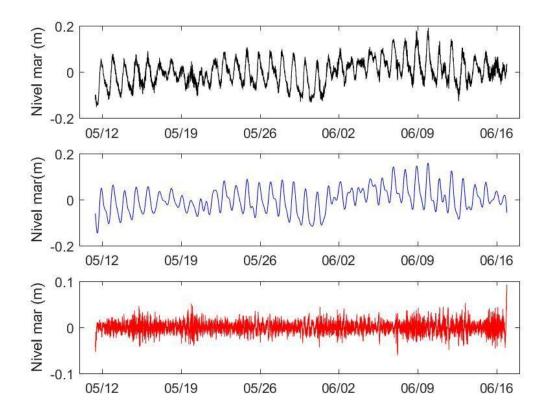


Figura 29. Variaciones de nivel del mar registradas en la bocana del puerto durante el presente estudio. A) variaciones del nivel del mar. B) Oscilaciones de marea. C) variaciones de frecuencia supramareal.

Los datos de ADCP muestran una circulación muy débil, típica de la costa Balear, dominada por fenómenos oscilatorios. Si bien la corriente media es del orden de unos pocos cm/s (ej. 2 a 5), los valores puntuales alcanzan frecuentemente los 15 cm/s. Como veremos en el siguiente apartado estas oscilaciones tienen importancia por su contribución a la resuspensión de los materiales finos depositados en el lecho marino.



Tal como se muestra en la Figura 30, estas oscilaciones más energéticas están dominadas por el periodo inercial (18 h), que responde a los pulsos de viento. La componente diurna y semidiurna de la marea constituyen una parte importante de la variabilidad, aunque en menor medida. Las corrientes tienen un marcado carácter barotrópico con una intensidad media de ~2.2 cm/s (Figura 31), con una ligera reversión en la capa límite del fondo. El eje mayor de variación de la corriente se alinea con la batimetría y con el eje principal de la bahía (unos 45°) y la corriente residual está dirigida hacia el puerto. Si bien un único correntímetro no permite determinar el patrón espacial de corrientes, a partir de las imágenes de SENTINEL y teniendo en cuenta que el transporte neto es hacia la playa, se puede inferir que la circulación en el interior del puerto es, por lo general, ciclónica, lo que favorece largos tiempos de residencia en la zona norte del puerto y la deposición del material particulado en esta zona. Este hecho concuerda con los informes que indican que esta zona del puerto experimenta una mayor deposición de materia particulada (DUNA, 2020).

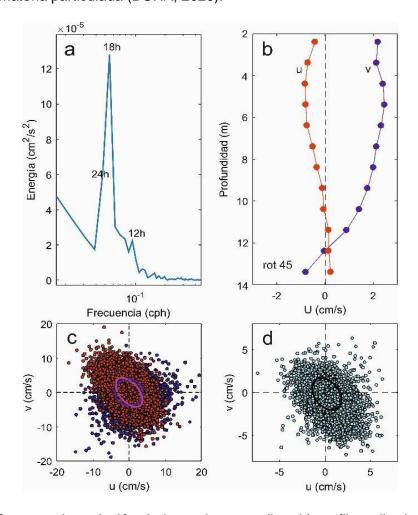


Figura 30. a) Espectro de variación de la corriente media y b) perfil medio de corrientes. Los vectores corrientes u y v se han rotado -45º para alinearlos con el eje principal de oscilación de la corriente. c) corrientes en superficie (rojo) y fondo (azul) y sus correspondientes elipses de variación. d) corriente media de la columna de agua y su elipse de variación.

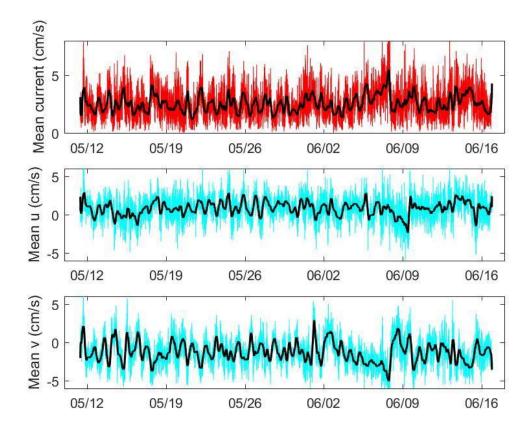


Figura 31. Variación de las corrientes en el punto de muestreo del presente estudio. A. Promedio vertical. B y C, Componentes longitudinal y transversal a la bocana del puerto. Ver anexo metodológico.

4.2.3 Granulometría e influencia del viento sobre la turbidez

Durante el año 1994 Demarcación de Costas realizó una caracterización exhaustiva de la granulometría de las playas de la Bahía de Sant Antoni. De acuerdo con dicho informe, la arena existente en la playa seca de Sant Antoni tiene un diámetro D50 promedio de 0,35mm a 0,37mm (Tecnología Ambiental, 1994). En la zona central de la playa donde está localizado el emisario submarino (Hotel Palmira) es donde aparecen las muestras con menor diámetro de toda la playa, 0.09mm.

En la zona sumergida la granulometría crece progresivamente desde 0,09mm en Sant Antoni a los 0,25 y 0,23mm en la zona más expuesta, al sur de la bahía. La granulometría de Cala Gració (parte Norte de la bahía) es bastante homogénea con arena media en toda la cala, excepto en fondos de 3 metros donde se encontraron sedimentos gruesos. Mar adentro la presencia de finos es más acusada, con arenas finas de diámetro promedio de 0,14mm en la isóbata de 1m y de 0,10mm en el de tres.



En general, podemos concluir la presencia de arenas muy finas y finas (0.09 a 0.20 mm) las zonas más someras de la playa sumergida. Estas fracciones de sedimentos junto al porcentaje de limos en el sedimento (10%) facilitan la resuspensión de material particulado en respuesta a pequeñas variaciones en los forzamientos físicos y antropogénicos (viento, oscilaciones en las corrientes, turbulencia generada por el paso de embarcaciones).

A partir de los valores granulométricos y de la velocidad de las corrientes podemos estimar la velocidad crítica (Vcr) para la resuspensión de los sedimentos. Esta relación se establece a partir de diversas variables como la densidad del sedimento, tamaño, geometría, etc. y existen diversas relaciones empíricas para ello. Utilizando la aproximación exponencial de Bogardi se puede obtener la curva de la velocidad crítica para distintos tamaños de sedimento (Figura 32). Tal como se muestra en la figura, el sedimento comenzaría a moverse a velocidades de la corriente de entre 8.5 y 12 cm/s que, como hemos mostrado anteriormente, son bastante frecuentes en la Bahía.

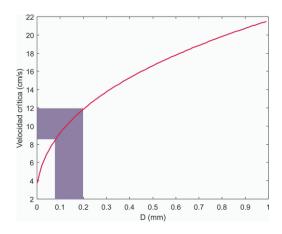


Figura 32. Relación entre el tamaño de sedimento y la velocidad crítica (Vr). Las zonas sombreadas muestran los valores correspondientes a la granulometría del sedimento del interior de la playa de Sant Antoni.

Los datos de ADCP permiten inferir la resuspensión del material particulado. Los ADCP emiten señales acústicas que se reflejan de vuelta hacia el transductor, proporcionando información sobre la velocidad y la dirección de las corrientes, así como sobre las propiedades del medio acuático, como la concentración de partículas suspendidas. Cuando se mide la intensidad del eco, la señal reflejada depende en gran medida de la densidad, el tamaño y la concentración de las partículas en suspensión. Las partículas más grandes o más densas, como sedimentos, plancton o material orgánico, tienden a reflejar más energía acústica, lo que genera una mayor intensidad en el eco. El fenómeno que subyace a esta relación se basa en la dispersión acústica. Cuanto mayor sea el número o el tamaño de las partículas, mayor será la cantidad de energía dispersada, y por ende, la mayor intensidad del eco reflejado hacia el transductor del ADCP. De esta forma, las variaciones en la intensidad del eco proporcionan una estimación indirecta de la concentración de partículas, lo que puede ser útil para estudiar la dinámica de los sedimentos o el comportamiento de organismos microscópicos en el agua.

La amplitud del eco (A, dB) generalmente sigue una relación inversa con la distancia al transductor, y depende de la concentración de partículas, su tamaño y su densidad. Una forma simplificada de expresar esta relación es:

$$A = \alpha C^n e^{-\beta D}$$

donde C es la concentración de partículas y D es la distancia al transductor.

En la Figura 33 se muestran los valores de eco una vez corregida la atenuación exponencial. El registro muestra una acumulación de partículas en la capa superficial que presenta variaciones de carácter diario. Este tipo de variabilidad suele estar inducida por los patrones de migración diaria de los organismos que componen el plancton. Por otro lado, se observan intensificaciones en el eco en la capa límite de fondo durante los días 17-18, 30-1 y 6 de junio. Estos eventos, de corta duración, se asocian a la resuspensión de material del sustrato marino producidos por la intensificación de las corrientes que, a su vez, están correlacionadas con las variaciones en la intensidad del viento. De hecho, las componentes axiales de la corriente media y del viento presentan una correlación significativa (r=0.54; ver Fig. 33).

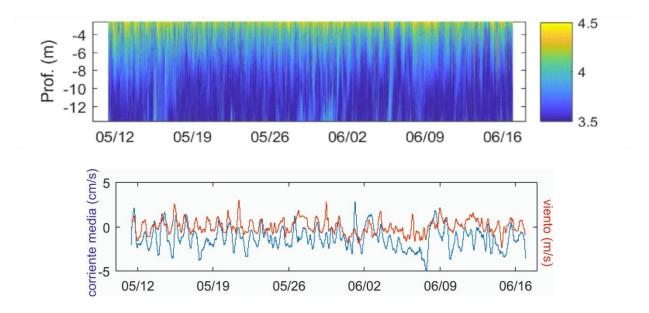


Figura 33. A) Amplitud de eco (log dB) y b) registros de la componente axial de corriente media e intensidad del viento durante el periodo analizado.



4.3 CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DEL SEDIMENTO Y EL MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN (SMP)

El material particulado suspendido (SPM) es un factor clave en la caracterización de las propiedades ópticas del agua, debido a su influencia en la atenuación de la luz a través de procesos de dispersión y absorción. La cantidad, tamaño y distribución de las partículas suspendidas modifican la transparencia del agua y limitan la penetración de la luz en la columna de agua (Jerlov, 1976; Kirk, 1994). El SPM incluye partículas de distinto tamaño y origen, tanto biológico (microorganismos y detritos orgánicos) como físico (sedimentos minerales resuspendidos o aportes externos). Estas partículas actúan como dispersores y absorbentes de luz, condicionando las características ópticas del agua.

Para estimar la distribución espacial del SMP en la Bahía de Sant Antoni se obtuvieron muestras de agua superficiales en una malla de muestreo de 38 estaciones (Ver Figura 34). Además, se realizaron perfiles verticales en un transecto de 4 estaciones en el que se obtuvieron 14 muestras. La distribución del SPM durante la campaña se analizó en función de la abundancia por rangos de tamaño (3-300 μm) y su gradiente espacial. Las mayores concentraciones se registraron en el interior de la bahía. Los datos muestran un incremento de partículas a partir de la línea imaginaria que une el Mirador de Ses Variades y Punta de Pinet. Los valores alcanzan 1.2x10⁷ partículas/L en áreas costeras, mientras que, en las aguas exteriores, las concentraciones de SMP disminuyen hasta las 1x10^6 partículas/L (ver Figura 34). Este patrón se mantiene a lo largo de todo el espectro de tamaños, si bien, las partículas de mayor tamaño (>50 micras) están muy restringidas a las zonas más someras de la bahía. Esta distribución sugiere que su origen no se debe a procesos bióticos, sino que obedece a procesos como la resuspensión de sedimentos y a posibles aportes terrestres (Figura 36). En contraste, las partículas pequeñas (<50 μm) son las más abundantes, alcanzando concentraciones de hasta 10 millones de partículas/L en el interior del puerto (Figura 35).

La variabilidad en la distribución del tamaño de partículas se puede interpretar a partir de la ley de potencias, que describe cómo varía la abundancia de partículas (N) en función de su diámetro equivalente (D) mediante la relación:

N(D)∝D-b

donde b es el exponente de la ley de potencias, que determina la pendiente del espectro de tamaños. Esta ley es ampliamente utilizada en oceanografía óptica y biológica porque refleja cómo se distribuye el material particulado en suspensión en función de su tamaño (Buonassissi and Dierssen, 2010; Reynolds et al., 2010). En condiciones ideales, b≈−4, lo que se conoce como distribución de Junge, que implica una disminución gradual de la abundancia conforme aumenta el tamaño de las partículas. Sin embargo, este valor varía según el tipo de agua:

- En aguas costeras, donde la productividad biológica suele ser alta y los sedimentos son más abundantes, el exponente suele ser mayor (b≈-3.5), indicando una mayor contribución relativa de partículas grandes.
- En aguas oceánicas, donde predominan partículas más pequeñas de origen biológico, el exponente es más bajo (b≈-4), reflejando la dominancia de tamaños reducidos.

A partir de un análisis de correspondencias canónicas (CCA) se confirma que el material particulado está dominado por células de fitoplancton, que representan más del 95% de las partículas suspendidas (ver Fig. 38). La mayor parte de estas son de pequeño tamaño (<15 µm). Sin embargo, tal como se muestra en la figura 38A; se observa una fracción de partículas de mayor tamaño (30-70 µm) que introduce una desviación local respecto a la tendencia habitual de la ley de potencias. Esta desviación da lugar a un exponente de b=-3.58 que sugiere la presencia puntual de células fitoplanctónicas o agregados de mayor tamaño que afectan el ajuste global de la distribución. Este resultado es coherente con las características de las aguas costeras, donde los procesos biológicos, como floraciones de fitoplancton o la formación de agregados, y físicos, como la resuspensión de sedimentos, pueden generan una mayor abundancia relativa de partículas grandes, y es compatible con los valores obtenidos en otras zonas costeras de las Islas Baleares con en la bahía de Palma (Font-Muñoz et al., 2015; 2017).

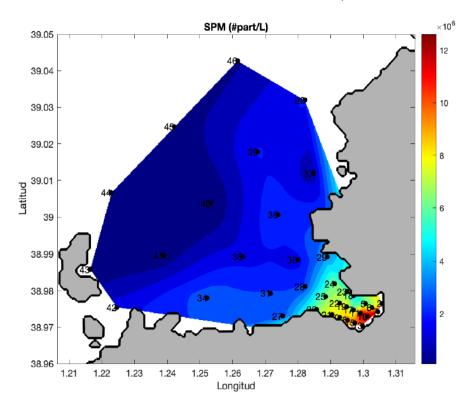


Figura 34. Distribución de SPM en el rango entre 2 y 300 micras en la Bahía de Sant Antoni. Valores expresados como número de partículas/litro.



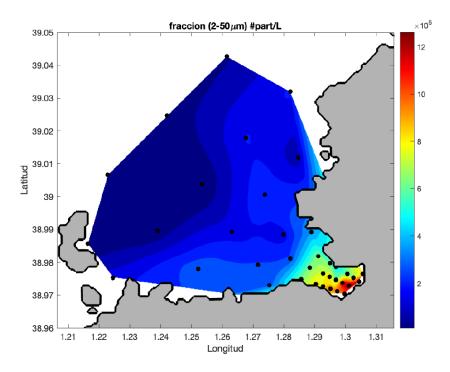


Figura 35. Distribución de SPM en el rango entre 2 y 50 micras en la Bahía de Sant Antoni. Valores expresados como número de partículas/litro.

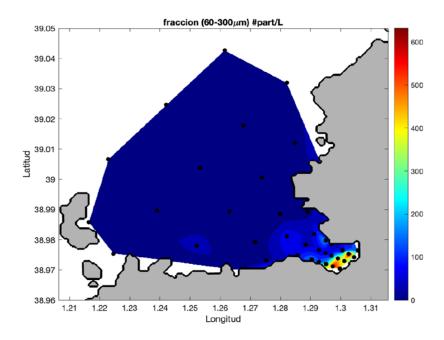


Figura 36. Distribución de SPM en el rango entre 60 y 300 micras en la Bahía de Sant Antoni. Valores expresados como número de partículas/litro.

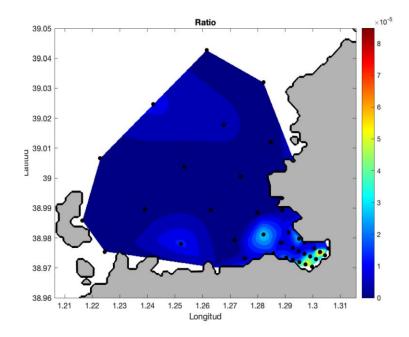


Figura 37. Ratio entre las partículas suspendidas (SPM) pequeñas (entre 2 y 50 micras) y grandes (entre 60 y 300 micras).

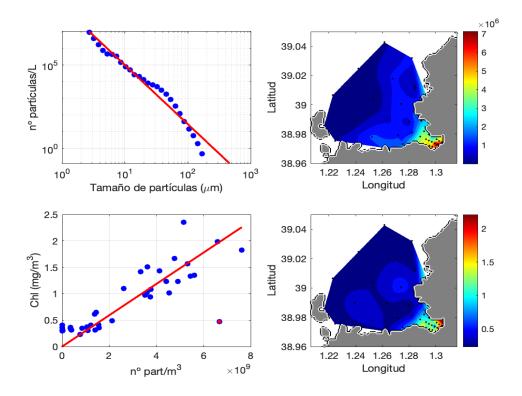


Figura 38. A) Espectro de tamaños del fitoplancton en la bahía de Sant Antoni y ajuste a ley de potencias (línea roja). B) Distribución espacial de la concentración de células de fitoplancton (nº part L-1). C) Relación entre la concentración de partículas suspendidas y la concentración de Chla (R=0.85, p<0.001). D) Distribución espacial de la concentración de clorofila-a (mg m⁻³).



4.3.1 Influencia de la escorrentía en la turbidez y la concentración de clorofila-a

Para analizar la influencia de la escorrentía sobre la turbidez de las aguas de la Bahía se han utilizado productos de turbidez y clorofila-a derivados de las imágenes satelitales SENTINEL-2. Se han obtenido imágenes promedio durante períodos donde no hubo precipitación y por lo tanto se entiende que la escorrentía es baja y por otro lado se obtuvieron imágenes satelitales posteriores a eventos de precipitación abundante acumuladas en las 24 horas previas al paso del satélite. Se pretende con ello evaluar si la turbidez y la clorofila-a se modifica como consecuencia del aumento de la escorrentía. Se han analizado tres eventos específicos de precipitación acumulada elevada en las 48 horas previas al paso de satélite: 24/10/2021 (95 mm), 19/09/2022 (67mm) y 19/08/2024 (35 mm).

El promedio de imágenes satelitales correspondiente a periodos con baja escorrentía muestra que la turbidez en el área de estudio varía entre 0 y 4 NFU, siendo el margen noreste de la Bahía la única zona donde se registran valores relativamente altos, de 3 a 4 NFU (Fig. 39). Estos valores son consistentes con los observados en áreas costeras de las Islas Baleares, caracterizadas por aguas claras con baja presencia de material ópticamente activo. Es importante destacar que los puntos de color rojo visibles en las imágenes corresponden a la señal embarcaciones censadas en el momento del paso del satélite.

Tras los eventos de precipitación abundante se registra un aumento en la turbidez (20-150%) en el interior de la Bahía, alcanzando valores de 10 NFU. Es importante señalar que la extensión espacial de la turbidez varía significativamente en función de la precipitación. Así, después de los eventos del 24 de octubre del 2021 (Fig. 40) y 19 de septiembre de 2022, el incremento de turbidez quedó restringido a la zona norte del puerto (Fig. 41). Sin embargo,

tras la DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) del 19 de agosto de 2024, los niveles de turbidez de hasta 3 NFU se extendieron más allá de la Bahía (Fig. 42). La explicación a la mayor turbidez de este último evento probablemente radica en la duración de la DANA, de la que se recogieron precipitaciones significativas durante tres días seguidos.

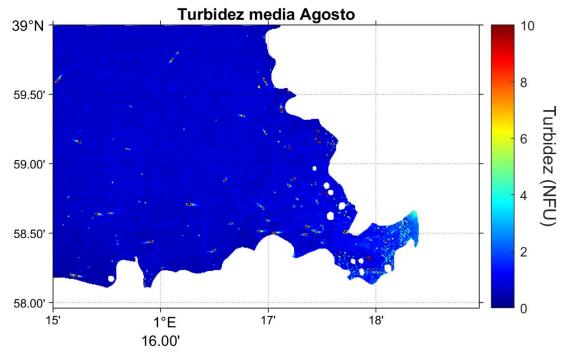


Figura 39. Turbidez media (NFU) de 5 imágenes correspondientes al mes de agosto en el periodo 2018-2024.

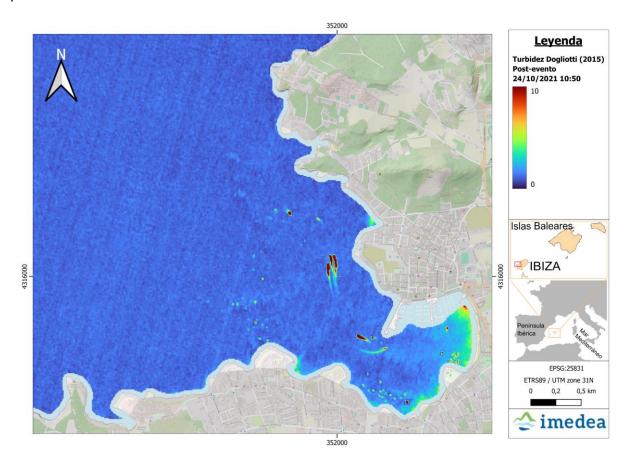


Figura 40. Imagen SENTINEL-2 de turbidez (NFU) en la Bahía de Sant Antoni el día 24/10/2021.



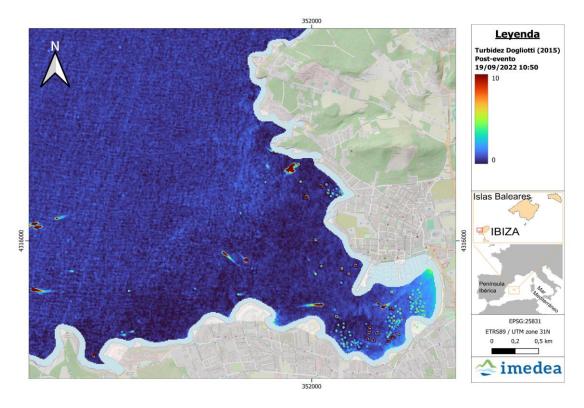


Figura 41. Imagen SENTINEL-2 de turbidez (NFU) en la Bahía de Sant Antoni el día 19/09/2022.

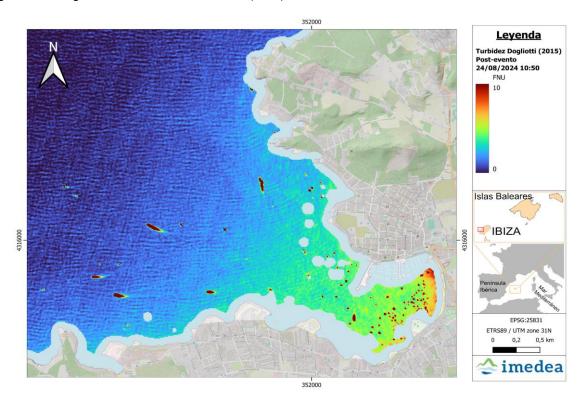


Figura 42. Imagen SENTINEL-2 de turbidez (NFU) en la Bahía de Sant Antoni el día 24/08/2024.

La Figura 43 muestra la distribución de la clorofila en la Bahía de Sant Antoni durante periodos en los que la escorrentía es baja - época seca -. En la zona exterior de la Bahía los valores son inferiores a 0.5 mg/m³, tal como se confirma los en los muestreos realizados in situ, mientras que en la zona del puerto pueden superar los 6 mg/m³. Estos valores máximos deben interpretarse con cautela ya que la señal satelital puede estar afectada por la adyacencia a costa y/o por la presencia de otros componentes ópticamente activos, como sedimentos en suspensión. De hecho, el valor máximo observado durante la campaña realizada en 2024 fue de 2.4 mg/m³.

Las concentraciones de clorofila observadas fuera de la Bahía corresponden a valores típicos del Mar Balear, que usualmente oscilan entre 0.1 y 0.3 mg/m³ (Gómez-Jakobsen et al., 2022). A diferencia de la turbidez, en las imágenes de satélite no se observan variaciones significativas de clorofila en los días inmediatamente posteriores a los episodios de lluvias intensas (Figura 44, 45 y 46). Este hecho es esperable ya que la respuesta del fitoplancton se ve moderada por la fisiología de los organismos involucrados y por sus interacciones ecológicas, en contraposición a la turbidez que está determinada únicamente por procesos físicos.

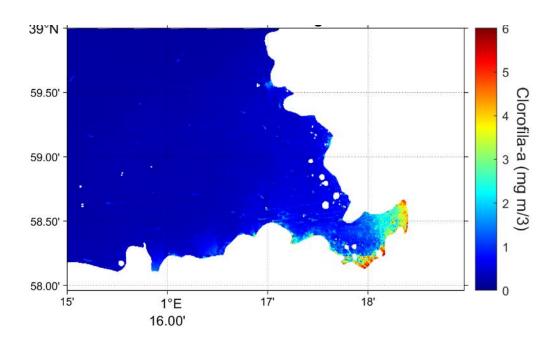


Figura 43. Promedio de 5 imágenes de clorofila-a (mg/m3) correspondiente al mes de agosto en el periodo 2018-2024. Datos del satélite Sentinel-2.



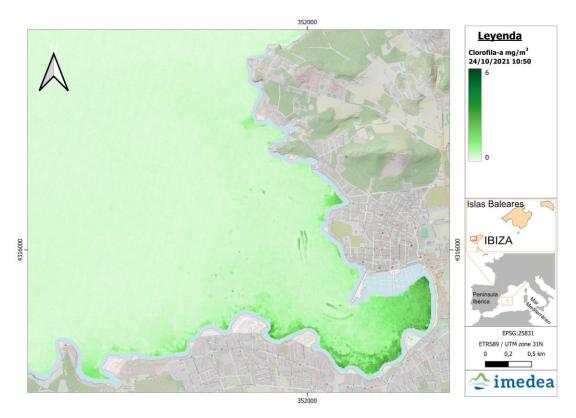


Figura 44. Imagen SENTINEL-2 de clorofila-a en la Bahía de Sant Antoni el día 24/10/2021.

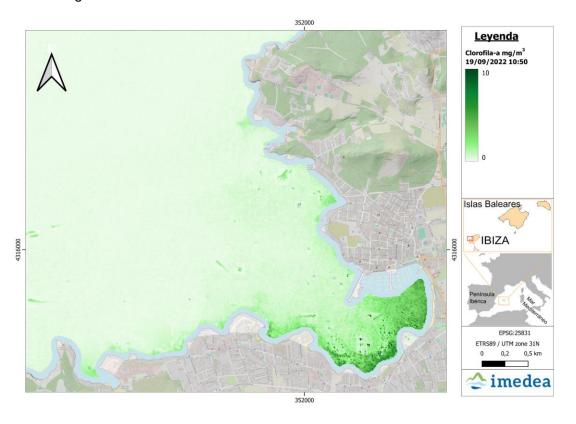


Figura 45. Imagen SENTINEL-2 de clorofila-a en la Bahía de Sant Antoni el día 19/9/2022.

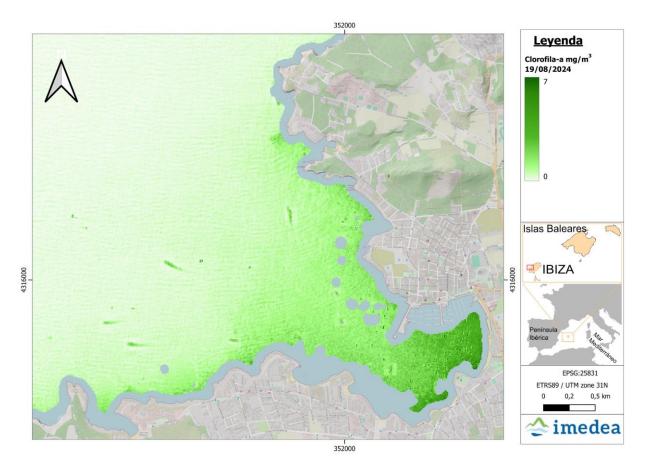


Figura 46. Imagen SENTINEL-2 de clorofila-a en la Bahía de Sant Antoni el día 19/08/2024.

4.4 CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE LAS AGUAS DE BAÑO

Los indicadores microbiológicos se utilizan para evaluar los riesgos para la salud asociados con el baño en aguas recreativas contaminadas con aguas residuales. La legislación española, al igual que la normativa de otros países, se basa en la utilización de las abundancias de enterococos y Escherichia coli como indicadores apropiados para monitorear las aguas recreativas. Estas directrices se basaban en la evidencia científica que indica que tanto E. col como los enterococos presentan una elevada correlación positiva con los casos de gastroenteritis asociada a la natación. Las posibles fuentes de estas bacterias entéricas incluyen las aguas residuales humanas sin tratar, los efluentes de las edares y las escorrentías de desagües pluviales heces de animales, etc.

El análisis del estado microbiológico de las aguas de baño de la Bahía de Sant Antoni se ha realizado a partir de los datos históricos (2008-2024) de presencia de *Escherichia coli* (EC) y Enterococos intestinales (ENT) proporcionados por la *Conselleria de Salut i Consum*. Estos indicadores se utilizan para determinar la presencia de contaminación de origen fecal y calcular



la calificación anual del agua de baño (de acuerdo al Real Decreto 1341/2007 sobre la gestión de la calidad de las aguas de baño). La contaminación por bacterias entéricas puede proceder tanto de actividades urbanas como de actividades agrícolas o ganaderas. Las pérdidas en la red, las lluvias intensas y fuertes escorrentías pueden ocasionar la contaminación microbiológica de las aguas de baño en zonas urbanas.

Los Enterococos son mucho más resistentes que *Escherichia coli* a la insolación solar y a la salinidad del mar, por lo que indican que la contaminación fecal lleva cierto tiempo en el agua, mientras que *EC* señala una fuente de contaminación fecal reciente. En el momento del aporte de aguas fecales, los valores de *EC* son directamente proporcionales a los valores de ENT. A medida que transcurre el tiempo desde el aporte de aguas fecales, EC va perdiendo viabilidad, bajando su detección en el análisis, mientras que ENT mantiene sus niveles. Una correlación muy alta entre ambas variables es indicativa de contaminación reciente y de carácter local. No es posible definir con exactitud qué tiempo permanecen ambas en el agua.

Las aguas de baño costeras y marítimas se clasifican (anexos I y II del R.D. 1341/2007) en las categorías de calidad insuficiente, suficiente, buena o excelente cuando en la serie de datos correspondiente al último periodo de evaluación (temporada actual más las tres anteriores), los valores del percentil que corresponda en cada caso se ajusten a los intervalos mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación microbiológica de las aguas de baño según anexos I y II del R.D. 1341/2007. (*) Con arreglo a la evaluación del percentil 95. (**) Con arreglo a la evaluación del percentil 90.

	Calidad			
	Excelente	Buena	Suficiente	Insuficiente
Escherichia coli	≤250*	≤500*	≤500**	>500**
(UFC o NMP/100ml)				
Enterococos intestinales	≤100*	≤200*	≤185**	>185**
(UFC o NMP/100ml)				

Los registros analizados en el presente estudio corresponden a 9 puntos de muestreo de la Bahía de Sant Antoni, de los que 5 estarían localizados en el municipio de Sant Antoni de Portmany y 4 en Sant Josep de sa Talaia, según se muestra en la figura 47. Además, se han utilizado los datos de 3 playas situadas fuera de la Bahía (Cala Tarida, Salines y Playa d'en Bossa) como referencia de sistemas menos contaminados.

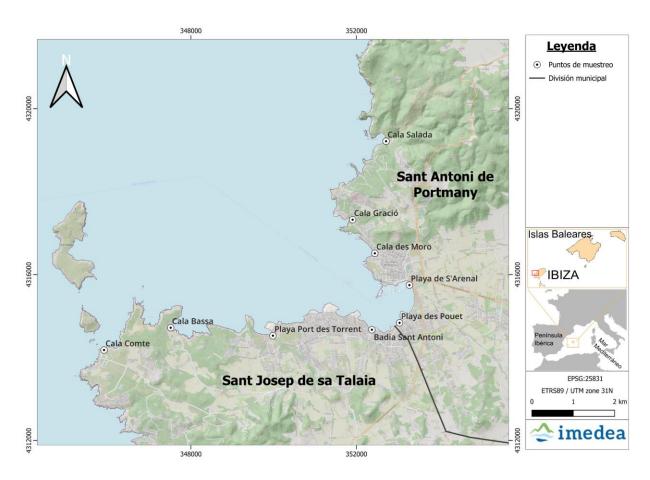


Figura 47: Localización de los puntos de muestreo de calidad microbiológica en el periodo 2008-2024 por parte de la Conselleria de Sanidad y Consumo de las Islas Baleares en la zona de estudio.

Aunque los límites de la legislación están diseñados para una evaluación anual de la serie, los tomaremos como referencia de excedencia. Las estaciones que más han superado el límite de 185 UFC/100 ml EC en el total de la serie son S'Arenal (12% de los muestreos), Port des Torrent (9%), Badía de Sant Antoni (8%) y Es Pouet y Cala Bassa (7%). En enterococos la excedencia del límite de 500 UFC/100 únicamente se excede en S'Arenal (1%) y en Badía de Sant Antoni (2%). Cada uno de estos dos últimos puntos corresponde a un municipio distinto (Fig. 47).

La estadística descriptiva de las series se recoge en la figura 48. Los valores de EC son más elevados en la zona de costa que discurre entre el Caló des Moro y Cala Compte. La mediana en estas estaciones (10 UCF/100 ml) duplica los valores de las estaciones de referencia. De igual modo, los valores de Ent son más elevados en la misma zona, si bien, el valor de la mediana es más variable. Sorprende que los valores de Ent en el Pouet sean significativamente más bajos (mediana=2).



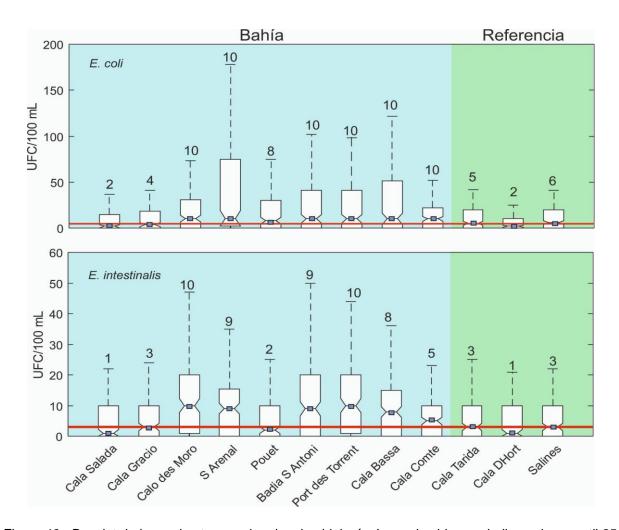


Figura 48. Boxplot de las series temporales de microbiología. Las cajas blancas indican el percentil 25 y 75 de cada serie. El cuadrado azul muestra la mediana cuyo valor se indica sobre cada caja. Las líneas discontinuas indican los límites de las series exceptuando los outliers. La línea roja indica el valor medio de las estaciones de referencia o menos contaminadas mostradas con fondo verde (Tarida, D'Hort y Salines).

Centrándonos en los sitios con mayores valores de bacterias entéricas, S'Arenal y Badia de Sant Antoni, ambos están localizados en zonas fuertemente urbanizadas en donde se concentran las salidas de pluviales y la influencia de las desembocaduras de los torrentes (Fig. 50). En ambos casos los valores de EC se han incrementado progresivamente desde el año 2015 a menudo mostrando eventos con concentraciones de bacterias que exceden los límites legales. Por el contrario, los eventos de *E. intestinalis* parecen haber remitido desde 2018. Cabe recordar que la presencia de esta bacteria es indicadora de contaminación reciente. En el ANEXO 2 se recogen las series temporales de todas las playas analizadas.

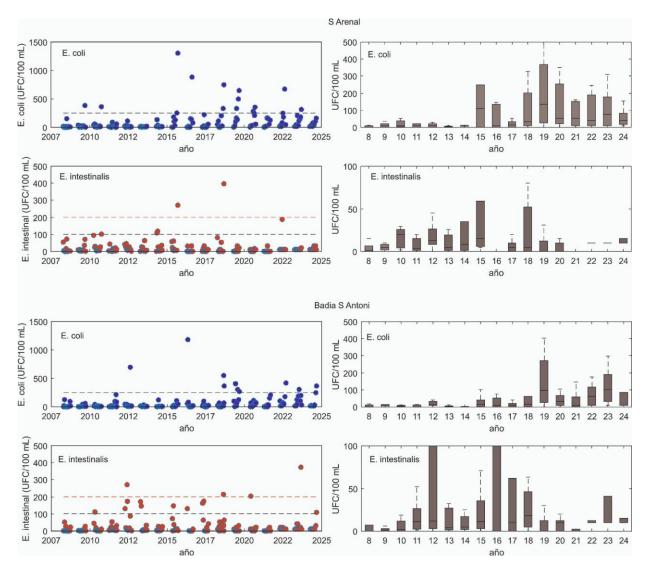


Figura 49. Serie temporal (2008-2024) de EC y Ent a lo largo de los años en los puntos S'Arenal y Badía. Las figuras de la izquierda muestran los datos en bruto y las de la derecha indican la distribución de los valores anuales mediante boxplots. Nótese que las escalas son distintas.



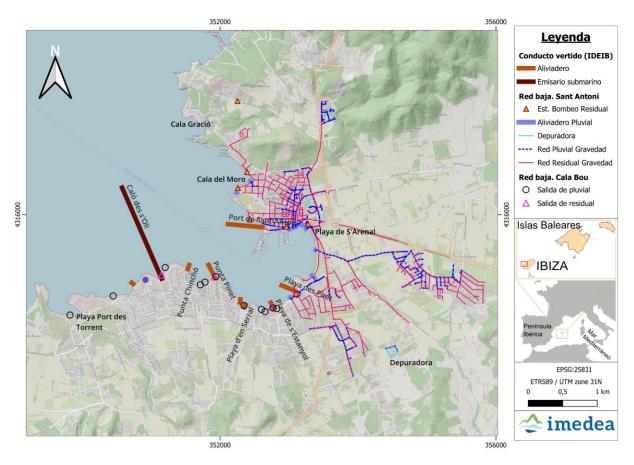


Figura 50. Red en baja de Sant Antoni incluyendo el emisario y los aliviaderos de pluviales.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las bahías son zonas preferenciales de asentamiento humano en las que, debido a las condiciones hidrográficas e hidrológicas, son particularmente sensibles al deterioro ambiental. La escasa renovación de las aguas en dificulta la dispersión de contaminantes provenientes de descargas urbanas, industriales y agrícolas que tienden a acumularse, aumentando la concentración de nutrientes, materia orgánica en suspensión y contaminantes. Esto puede desencadenar procesos de eutrofización, caracterizados por el crecimiento descontrolado de microalgas, la reducción de la luz disponible para la vegetación marina y la disminución de oxígeno disuelto, lo que pone en riesgo la biodiversidad acuática.

El estado ambiental de la bahía Sant Antoni presenta claros signos de deterioro debido a la creciente antropización. Además, algunos de los problemas ambientales identificados a lo largo del presente informe se agudizarán como consecuencia de la actual tendencia climática. Por ello, se requieren actuaciones que contemple tanto los efectos del aumento demográfico y la concentración de la población en el litoral, como el impacto del cambio climático. La expansión urbana, junto con la intensificación de actividades turísticas y económicas, ejerce una fuerte presión sobre los ecosistemas costeros, favoreciendo la degradación de la calidad del agua, la pérdida de hábitats naturales y el incremento de la contaminación microbiológica. El cambio climático exacerba estos problemas al provocar cambios ambientales como el aumento de la temperatura, la variación en el régimen de precipitaciones y el aumento del nivel del mar, lo que genera aún más estrés en los entornos de las bahías. Para abordar estos problemas se requiere una gestión costera sostenible, controles más estrictos de la contaminación y esfuerzos de conservación para restaurar y proteger estos ecosistemas marinos vitales.

La gestión integral y sostenible del agua urbana desempeña un papel crucial a la hora de minimizar la contaminación de la Bahía. Las zonas urbanas concentran la escorrentía, que arrastra contaminantes urbanos, de instalaciones industriales y obras antes de desembocar en la costa. La implementación de soluciones de infraestructura verde, como pavimentos permeables, estanques de retención y jardines de lluvia, ayuda a filtrar los contaminantes y frenar la escorrentía antes de que llegue al mar. Además, la mejora de los sistemas de alcantarillado, la prevención de vertidos ilegales y el fomento del reciclaje del agua pueden reducir la cantidad de aguas residuales sin tratar que se vierten al mar. La concienciación pública, las reglamentaciones estrictas y la inversión en sistemas inteligentes de gestión del agua favorecen que el crecimiento urbano no degrade la calidad del agua costera.

El cambio climático está alterando la temperatura y los patrones de precipitación en la región del Mediterráneo, generando efectos significativos en los ecosistemas y la disponibilidad de agua. La actual tendencia del aumento de la temperatura del agua favorece los procesos de degradación bacteriana, con efectos sobre otros organismos y sobre el propio funcionamiento



de los ecosistemas marinos que son difíciles de anticipar pero que, en todo caso, incrementan la vulnerabilidad de los ecosistemas marinos. Por otro lado, los estudios climáticos vaticinan una tendencia hacia una reducción general en las lluvias anuales, acompañada de una mayor irregularidad en su distribución. Mientras que los períodos de sequía se vuelven más prolongados e intensos, los episodios de lluvias extremas y torrenciales son cada vez más frecuentes, aumentando el riesgo de inundaciones y erosión del suelo. Estos cambios afectan al transporte de sedimentos, materia orgánica y contaminantes a través de los torrentes lo que, en el caso de la bahía de Sant Antoni, puede resultar en episodios intensos de incremento de la turbidez y exceso de materia orgánica que afecte a las comunidades de algas bentónicas y fanerógamas marinas.

Para mitigar estos efectos climáticos, la renaturalización de los cauces de los torrentes es una estrategia clave que contribuye a mejorar la resiliencia de los ecosistemas costeros. Varios cauces de los torrentes de la Bahía están cimentados en su tramo final y reciben aportes puntuales de obras y efluentes de otras actividades en sus márgenes que sería necesario minimizar. En un contexto de aumento de eventos climáticos extremos, como lluvias torrenciales y seguías prolongadas, la restauración de los cauces naturales permite una mejor gestión del agua, reduciendo el riesgo de inundaciones y la erosión del suelo. Al devolver a los torrentes su curso natural, se favorece la infiltración del agua en el suelo, lo que ayuda a recargar los acuíferos y a mantener un flujo base más estable en épocas de seguía. Además, la revegetación de las riberas con especies autóctonas estabiliza el suelo, retiene sedimentos y mejora la calidad del agua al filtrar contaminantes y reducir la carga de nutrientes que llegan a los ecosistemas acuáticos y costeros. Recuperar la estructura y función natural de los torrentes en su curso bajo es una medida eficaz para adaptarse a los desafíos del cambio climático, proteger los recursos hídricos y restaurar el equilibrio ecológico en las cuencas hidrográficas además de ser compatible con el uso turístico y recreativo de dichas zonas. Esta medida tendría un potencial económico, al revalorizar el valor turístico del paisaje.

La turbidez causada por durante los episodios de lluvias intensas reduce la penetración de la luz en la columna de agua, lo que limita la fotosíntesis de los organismos bentónicos. Sin suficiente luz, las algas y las fanerógamas marinas experimentan un menor crecimiento, debilitamiento y, en casos extremos, mortalidad. Por otro lado, el exceso de materia orgánica también genera impactos negativos al aumentar la demanda biológica de oxígeno durante su descomposición. Este proceso puede conducir a la hipoxia o anoxia, reduciendo la disponibilidad de oxígeno disuelto en el agua y afectando la respiración de las plantas marinas. Además, la descomposición de materia orgánica puede liberar compuestos del sedimento, como el sulfuro de hidrógeno, que pueden perjudiciales para estos organismos.

La pérdida de vegetación bentónica, como fanerógamas y macroalgas, tiene un impacto significativo en la resuspensión de sedimentos, afectando la estabilidad de los ecosistemas costeros. Estas plantas desempeñan un papel clave en la fijación del sustrato marino mediante sus raíces y rizomas, lo que ayuda a reducir la erosión y el movimiento de partículas en la columna de agua. Cuando la vegetación desaparece los sedimentos quedan expuestos y son fácilmente resuspendidos por las corrientes y el oleaje. Tal como se muestra en el presente estudio, pequeñas variaciones en la intensidad de las corrientes, bien producidas por cambios

en el nivel del mar y, más frecuentemente, por el viento, inciden negativamente sobre la turbidez. Las zonas más vulnerables a la resuspensión son aquellas de menor profundidad y con fondos desprovistos de vegetación.

Por otro lado, las algas compiten por lo nutrientes con el fitoplancton marino. La desertización de los fondos supone una mayor disponibilidad de nutrientes en la columna de agua que puede dar lugar a proliferaciones de fitoplancton marino que, como hemos mostrado en el presente estudio, contribuye de forma importante a la atenuación de la luz en la columna de agua y proporciona coloración a las aguas costeras. Por ello, preservar la vegetación de los fondos marinos y, eventualmente, contemplar actuaciones de revegetación puede favorecer la transparencia de las aguas.

Una de las actividades que contribuye al deterioro ambiental de las zonas someras de la Bahía es el tráfico marítimo y el fondeo de embarcaciones. Tal como se muestra en el apartado de 'actividad económica', la actividad del sector náutico recreativo y turístico durante la época de verano es muy intensa. La serie histórica de ortofotografías del puerto indican un deterioro de la cobertura vegetal en el interior del puerto. Las hélices de los barcos y la turbulencia generada por su paso afectan a la estabilidad del sedimento marino, incrementando la turbidez del agua. Para mitigar estos impactos, es fundamental regular la velocidad de navegación en zonas sensibles, establecer áreas protegidas con restricciones al tráfico marítimo, fomentar el uso de anclajes ecológicos evitando los círculos de borneo y promover prácticas sostenibles en la gestión portuaria. Para que sean efectivas, estas medidas deben ir acompañadas de un control riguroso del cumplimiento de la normativa.

El análisis de la calidad microbiológica de las aguas indica la existencia de contaminación fecal, si bien, los niveles medios de contaminación no son preocupantes y sólo excepcionalmente se exceden los valores establecidos por la normativa de aguas de baño. Si es preocupante que la información disponible indique una tendencia positiva en la contaminación por E. coli. Desgraciadamente, los datos disponibles, reducidos a muestreos quincenales durante la época estival, no permiten un análisis detallado de los episodios de contaminación. Sería recomendable mejorar la resolución espacial y temporal de los muestreos.

Los datos analizados muestran unos niveles de contaminación bastante homogéneos a lo largo de la costa, si focos específicos. Son varias las causas que pueden influir en ello. Por un lado, la ya mencionada falta de resolución en el diseño de los muestreos. Por otro lado, puede deberse a que la fuente de contaminación de bacterias entéricas obedezca a pequeños aportes y pérdidas en las redes de aguas residuales y/o pluviales distribuidos a lo largo de la costa. Adicionalmente, los vertidos directos de las embarcaciones fondeadas en la bahía puede ser una fuente importante de este tipo de contaminación durante el verano, cuando la concentración de embarcaciones recreativas es muy elevada.

En conclusión, la Bahía de San Antoni presenta problemas signos de deterioro que deberían abordarse tanto mediante actuaciones que implican obra pública, normativas regulatorias y fomento de responsables. Solo a través de una planificación ambiental integrada y el compromiso y colaboración de todos los actores sociales será posible hacer efectiva la conservación de la bahía y su sostenibilidad a largo plazo.



6.REFERENCIAS

ABAQUA 2022.Calidad de las aguas residuales depuradas. https://abaqua.cat/es/seccio/qualitat-de-les-aigues-residuals-depurades/

Ayuntamiento de Sant Antoni 2021 Plan especial en situación de alerta y sequía del municipio de Sant Antoni. 40 pp.

Buonassissi, C.J., y Dierssen, H.M., 2010. A regional comparison of particle size distributions and the power law approximation in oceanic and estuarine surface waters. Journal of Geophysical Research: Oceans 115, C10028. doi:10.1029/2010JC006256

Calvo, J., Roig, I., Tomé, D., Pérez, M. y Janer, J. 2018 Informe Anual 2018 Ibiza Preservation Foundation y Observatorio de Sostenibilidad de Ibiza. 297 pp.

Cofradía de pescadores de Sant Antoni, 2024. www.peixnostrum.com/los-pescadores-ibiza-y-sanantonio/

Díaz-Almela, E., Marbà, N., Álvarez, E., Santiago, R., Holmer, M., Grau, A., Mirto, S., Danovaro, R., Petrou, A., Argyrou, M., Karakassis, I. y Duarte, C.M., 2008 Benthic input rates predict seagrass (*Posidonia oceanica*) fish farm induced decline. Marine Pollution Bulletin 56(7), 1332–1342.

Dogliotti, A. I., Ruddick, K., Nechad, B., Doxaran, D. y Knäps, E. 2015. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. Remote Sensing of Environment 156, 157–168.

Duarte, C.M. y Chiscano, C.L. 1999 Seagrass biomass and production: a reassessment. Aquatic Botany 65(1-4), 159–174.

DUNA Consultores 2020 Análisis y diagnóstico de las comunidades marinas de la Badia de Portmany. 47 pp.

Font-Muñoz, J.S., Jordi, A., Angles, S. y Basterretxea, G. 2015. Estimation of phytoplankton size structure in coastal waters using simultaneous laser diffraction and fluorescence measurements. Journal of Plankton Research 37, 740–751. doi:10.1093/plankt/fbv041

Font-Muñoz, J.S., Jordi, A., Tuval, I., Arrieta, J., Anglès, S. y Basterretxea, G. 2017. Advection by ocean currents modifies phytoplankton size structure. Journal of the Royal Society Interface, 14. doi:10.1098/rsif.2017.0046

Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS) 2009 Capítulo 4: Hidráulica de acuíferos.

García de Domingo, A., Díaz de Neira, J.A., Gil Gil, J., Cabra Gil, P. y Hernáiz Huerta, P. P. m009 Sant Antoni de Portmany, 798 I : mapa geológico de España escala 1:25.000. Instituto Geológico y Minero de España. 80pp.

Gómez-Jakobsen, F., Ferrera, I., Yebra, L. y Mercado, J.M. 2022 Two decades of satellite surface chlorophyll-a concentration (1998-2019) in the Spanish Mediterranean marine waters (Western Mediterranean Sea): Trends, phenology and eutrophication assessment, Remote Sensing Applications: Society and Environment 100855.

Govern Illes Balears, 2020. Projecte d'ordenació de la costa de la Badia de Portmany, dede Port del Torrent fins a Cala Gració. ITS 2017-029

Harmel, T., Chami, M., Tormos, T., Reynaud, N. y Danis, P.-A. 2018 Sunglint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands. Remote Sensing of Environment 204, 308–321.

Illes Balears Sostenibles 2020 Projecte d'ordenació de la costa de la Badia de Portmany, desde Port des Torrent fins a Cala Gració. Govern de les Illes Balears, Consell d'Eivissa, Ajuntament de Sant Antoni de Portmany y Ajuntament de Sant Josep de sa Talaia. 87pp.

Jerlov, N.G. 1976 Marine optics. Elsevier Oceanography Series, Vol. 14, pages iii-vii, 1-231.

Julià, M., del Valle, L., Bagur, M., Marsinyach, E., Pons, G. y Carreras, D. 2019 Cartografía de los hábitats marinos de las Islas Baleares: Compilación de capas y comunidades bentónicas. Institut Menorquí d'Estudis y Observatorio Socioambiental de Menorca. 157 pp.

Kirk, J.T.O. 1994 Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge.

Marbà, N., Jordà, G., y Bennett, S. y Duarte, C.M. 2022 Seagrass thermal limits and vulnerability to future warming. Frontiers in Marine Science, 9, Article 860826.

Millot, C. 1987 Circulation in the Western Mediterranean Sea. Oceanologica Acta 10, 2, 143-149.

Nechad, B., Ruddick, K. G., y Park, Y. 2010 Calibration and validation of a generic multisensory algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. Remote Sensing of Environment 114(4), 854-866.

Ofincar Granada 21 SL 2019 Estudio de la evolución de la línea de costa en las principales playas urbanas de las Islas Baleares 1956-2018. Ministerio para la Transición Ecológica. 116pp.

O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Siegel, D. & O'Brien, M. C. 2000. Ocean color chlorophyll-a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: version 4. In: Hooker, S. B. & Firestone, E. R. (eds.). SeaWiFS postlaunch technical report series, volume 11: SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, part 3 Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center.



O'Reilly, J.E. y Werdell, P.J. 2019 Chlorophyll algorithms for ocean color sensors - OC4, OC5 & OC6. Remote Sensing of Environment 229, 32-47.

Govern de les Illes Balears, 2015 Plan Hidrológico de las Islas Baleares 2015-2021. Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Territori. 497pp.

PortsIB, 2020 Informe de evaluación del tráfico comercial del puerto de Sant Antoni de Portmany. McValnera, 173 pp.

Reynolds, R.A., Stramski, D., Wright, V.M. y Woźniak, S.B. 2010 Measurements and characterization of particle size distributions in coastal waters. Journal of Geophysical Research: Oceans 115. doi:10.1029/2009JC005930

Tecnoambiente, s.a. 1995 Estudio de biosfera marina en la costa de San Antonio (Ibiza). Dirección General de Costas, Ministerio de Obras públicas, Transportes y Medio Ambiente.

Tecnología Ambiental, s.a. 1994 Estudio de la incidencia del vertido de arena en las playas de la Bahía de San Antonio, Talamanca y de Figueretas, hasta la playa d'en Bossa (Ibiza). Demarcación de Costas de Baleares, 64pp.

Vanhellemont, Q. y Ruddick, K., 2018 Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications. Remote Sensing of Environment 216, 586-597 (https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.015)

Vanhellemont, Q. 2019 Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. Remote Sensing of Environment 225, 175–192. (https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010)

ANEXOS

Los anexos constan de dos secciones. La primera centrada en la metodología llevada a cabo para la toma de muestras y datos oceanográficos. La segunda engloba las figuras obtenidas tras el análisis estadístico de los datos de microbiología para todas las estaciones de muestreo.

A.1 METODOLOGÍA

1. Corrientes marinas

El 11 de mayo de 2024 se realizó la instalación de un correntímetro en la Bahía de Sant Antoni para registrar datos de las corrientes submarinas. El instrumento se fondeó en la posición 38.97681° N, 1.29229° E a unos 14 metros de profundidad. El instrumento tomaba datos cada 10 minutos a 12 niveles en células de 1 metro promediando durante 30 segundos.

2. Sólidos en suspensión.

Los sólidos en suspensión se midieron mediante un difractómetro laser LISST-100X de la empresa SEQUOIA. Cada una de las muestras se midió durante 5 minutos (a una frecuencia de 1Hz) con el fin de obtener un promedio del espectro de tamaños de partículas suspendidas en un rango de 1 a 500 micras.

3. Imágenes satelitales

Se procesaron las imágenes ópticas del MSI de Sentinel-2, descargadas del servidor Dataspace Coopernicus. Sentinel-2 está compuesto por dos satélites idénticos, 2A y 2B, lanzados en junio de 2015 y marzo de 2017, respectivamente, por la Agencia Espacial Europea (ESA). Los dos satélites, ubicados en la misma órbita, pero desfasados 180°, permiten adquirir imágenes cada 5 días en las latitudes del área de interés. El Instrumento Multiespectral montado en Sentinel-2 cubre 13 bandas espectrales, desde longitudes de onda visibles hasta infrarrojo de onda corta, con una resolución espacial de entre 10 y 60 m, y anchos de franja orbital de hasta 290 km.

El software ACOLITE (acolite_py20180327), desarrollado por el Instituto Belga de Ciencias Naturales (RBINS, por sus siglas en inglés) fue elegido para calcular la reflectancia marina de superficie (pw(λ)) a partir de imágenes L1C-MSI. ACOLITE ofrece dos algoritmos de corrección atmosférica: el 'Dark Spectrum Fitting' (DSF), o ajuste de espectro oscuro, y el algoritmo de 'extrapolación exponencial' (EXP). El proceso de corrección atmosférica se detalla en los trabajos de Vanhellemont y Ruddick (2015), y Vanhellemont (2019).



Para el área de estudio, se ha optado por el método DSF, que se basa exclusivamente en la estadística de la imagen, sin considerar datos externos como el espesor óptico de los aerosoles, ya sean medidos o estimados. Este método asume una atmósfera homogénea sobre la imagen y predice la reflectancia atmosférica utilizando múltiples píxeles oscuros, seleccionados en función de los valores más bajos de reflectancia al tope de la atmósfera en todas las bandas. Además, incluye una opción para corregir el brillo (glint), que por defecto utiliza las bandas SWIR para estimar la señal, según Harmel et al. (2018).

Para estimar la turbidez superficial a partir de los valores de reflectancia de superficie (pw) obtenidos tras el proceso de corrección atmosférica, se aplicó el algoritmo semi-empírico propuesto por Dogliotti et al. (2015). La formulación operativa del algoritmo para calcular la turbidez (T; FNU) es la siguiente:

$$T = \frac{A_T^{\lambda} \cdot \rho_W(\lambda)}{(1 - \rho_W(\lambda)/c^{\lambda})}$$

1.

donde AT y C son coeficientes de calibración dependientes de la longitud de onda (Nechad, Ruddick y Park 2010; Dogliotti et. al., 2015). El algoritmo utiliza la banda 5 (865 nm, NIR) en caso de elevada turbidez, y alterna con la banda 4 (655nm, rojo) para aguas de moderada a baja turbidez.

Para obtener la Chl-a satelital, se utilizó el algoritmo global estándar OC3M (O'Reilly et al., 2000), que es actualmente empleado de forma operativa por la NASA y utiliza las bandas centradas en 443, 448 y 550 nm. Ambos algoritmos se basan en la reflectancia satelital para estimar el cociente máximo de Rrs entre dos o más bandas y ajustan esa relación a una ecuación polinómica de cuarto orden, que permite estimar un amplio rango de Chl-a global (O'Reilly et al., 2019). La forma funcional de los algoritmos es la siguiente:

$$log_{10}(Chla) = a_0 + a_1X + a_2X + a_3X + a_4X$$
,

2.

Donde a0...4 son los coeficientes de ajuste polimonial y X es:

$$X = log_{10}\left(\frac{\max(R_{rs}(\lambda_b), R_{rs}(\lambda_c), R_{rs}(\lambda_d))}{R_{rs}(\lambda_e)}\right),$$
3.

En la ecuación X, $\lambda b...d$ y λe son las longitudes de onda azul y verde, respectivamente. Los valores de los coeficientes a0...4 son 0,283; -2,753; 1,457; 0,659; -1,403.

Para obtener un mapa de turbidez y de clorofila-a correspondiente a aguas claras, se promediaron los valores de turbidez de cinco imágenes satelitales del mes de agosto, en el período de 2018 a 2024. En los casos de eventos de turbidez y clorofila-a asociados a lluvias

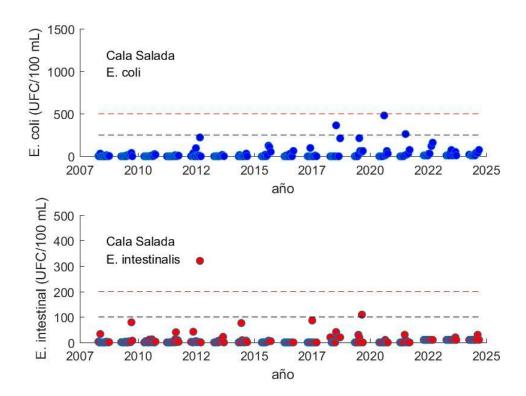
intensas, se procesó la imagen del día más cercano al evento, siempre que el porcentaje de nubes fuera inferior al 30%. La resolución espacial final de las imágenes es de 10 m y se utilizó la proyección Mercator. Cabe destacar que la corrección atmosférica (ACOLITE-DSF) y los productos satelitales obtenidos de turbidez (Dogliotti et al., 2015) y de clorofila-a (OC3M) no han sido aún validados con datos in situ para el área de estudio, por lo que no se presentan en este informe los errores de estimación.

4. Nutrientes

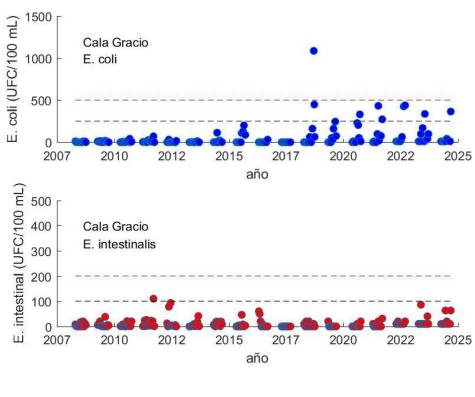
Las muestras de nutrientes fueron tomadas a bordo de la embarcación del IMEDEA durante la campaña de muestreo estival, así como desde la embarcación semirrígida de TRAGSA. Las muestras de agua de 15mL se prefiltraron con malla GF/F y se congelaron a -20 °C hasta su eventual análisis en el Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona por el Servicio de Química Marina. Los nutrientes inorgánicos se determinaron con un AA3 HR Seal Analytical con análisis de flujo continuo (CFA) para la determinación de nutrientes inorgánicos (nitrato, nitrito, fosfato, silicato), acoplado a un fluorómetro Jasco FP 2020 para la determinación de amonio.

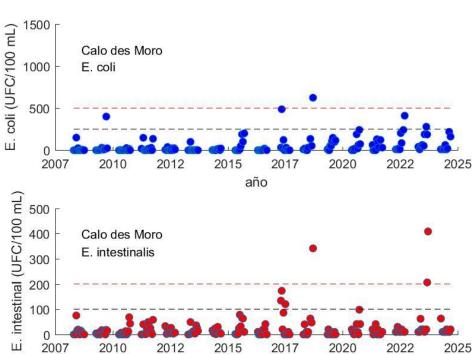
A2. MICROBIOLOGÍA

1 Series temporales

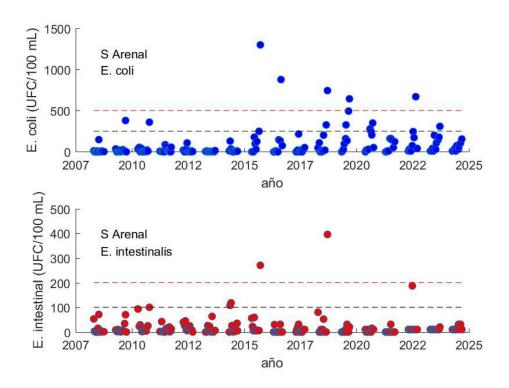


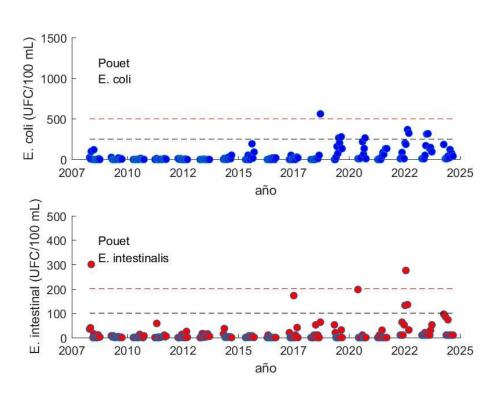




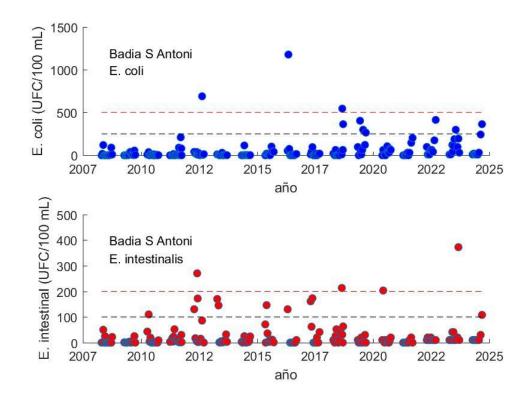


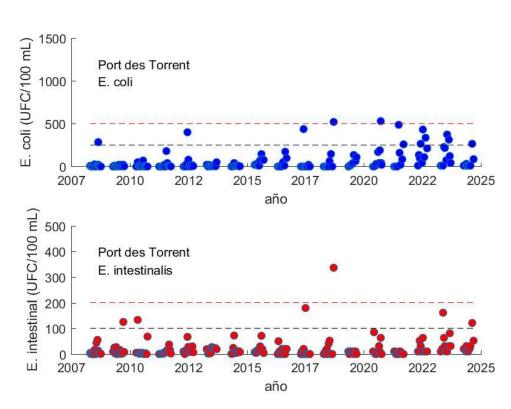
año

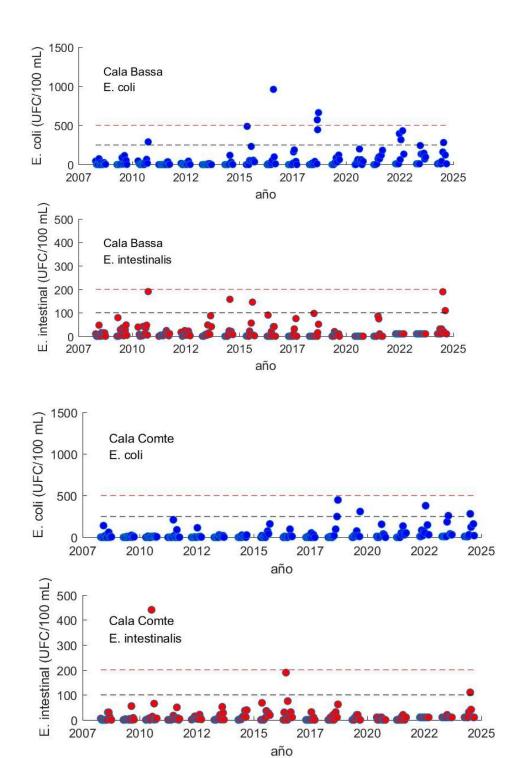




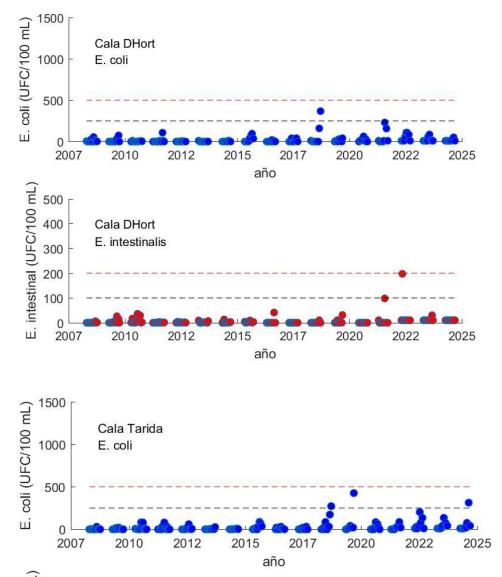


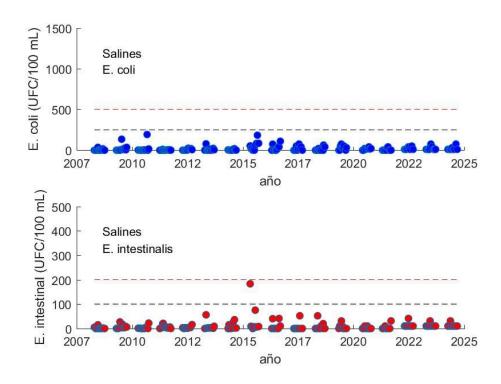






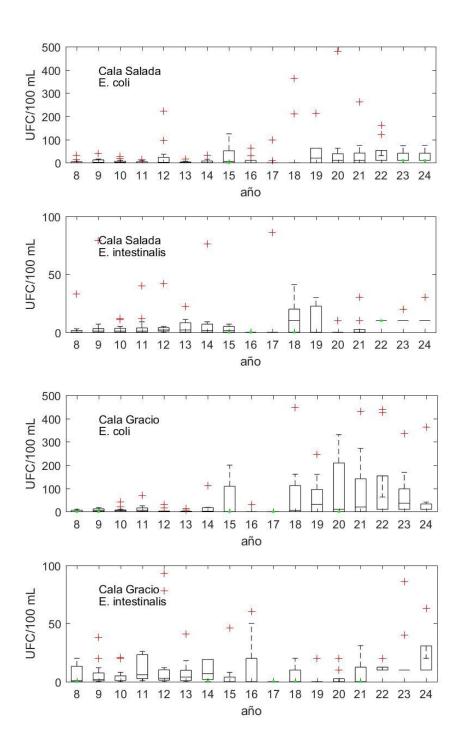




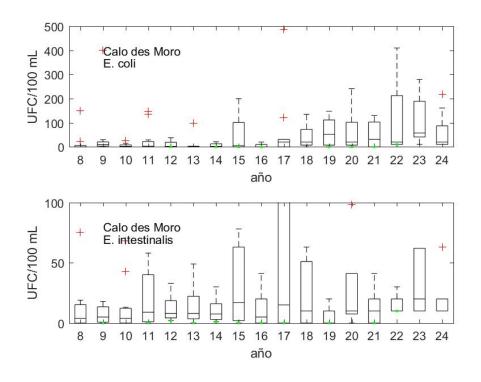


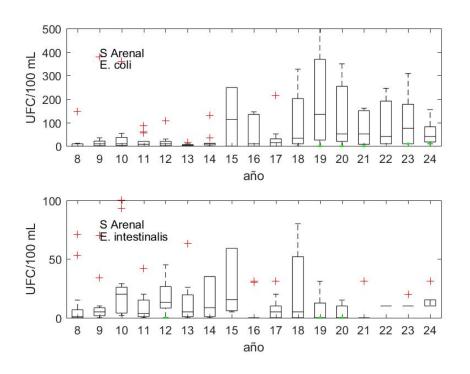


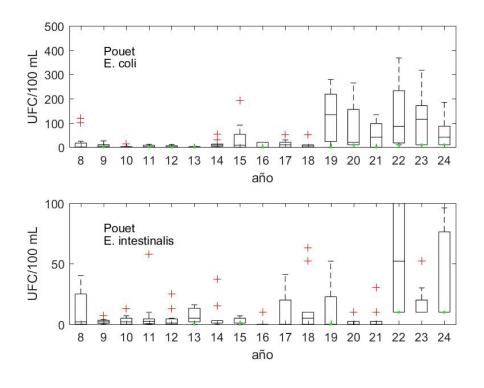
2 Boxplot

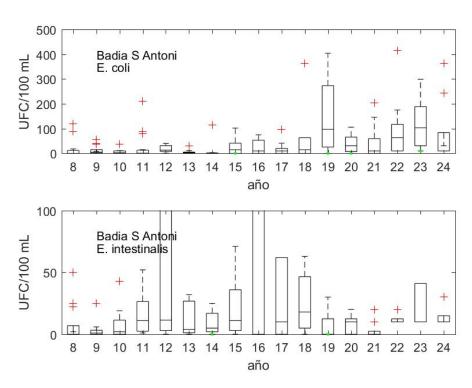




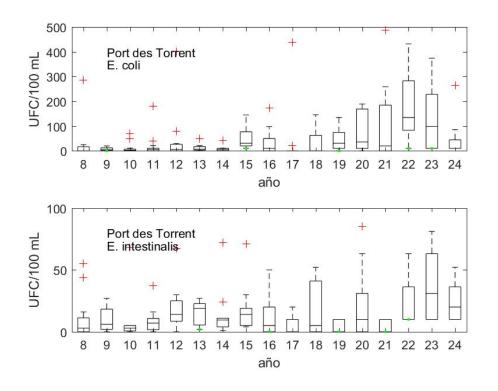


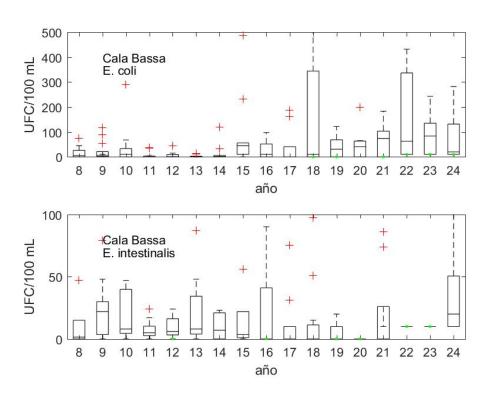


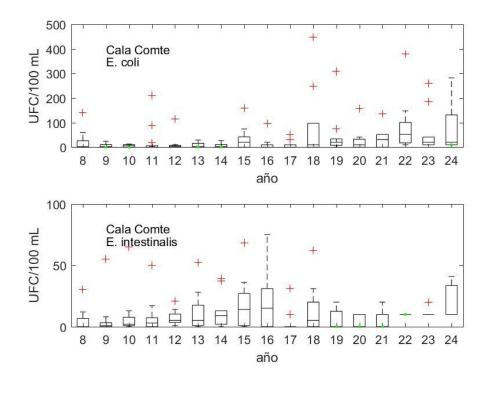


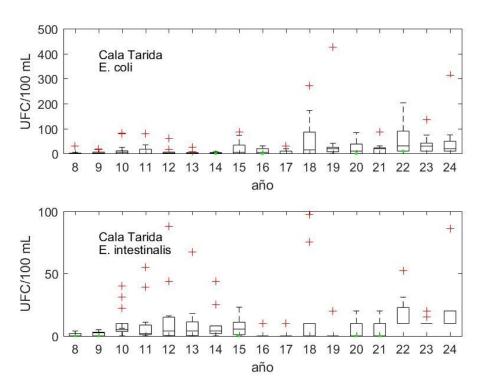




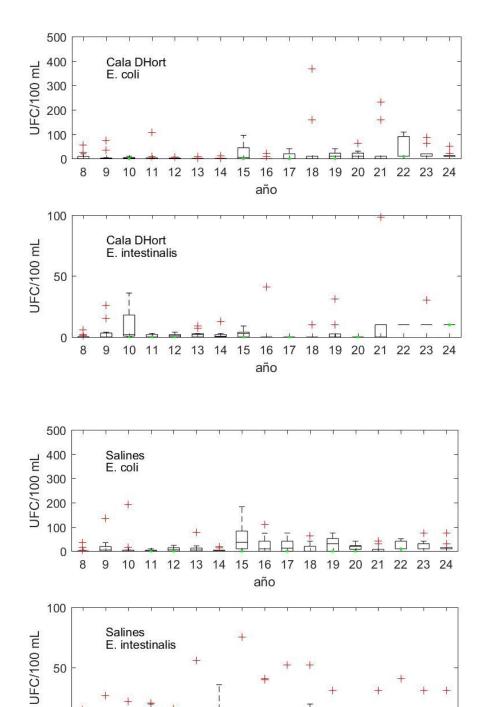












19 20 21 22 23 24

0 8

10 11 12 13

14 15

16 17 18

año

Estudio ambiental de la Bahía de San Antonio (Ibiza)